

Caracterización numérica de bio-compuestos

Trabajo Final de Grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Gonçal Seguí Garriga

Dirigido por:
Xavier Martínez García

Grado en Ingeniería en Sistemas y Tecnología Naval

Barcelona, Julio de 2018

Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento al profesor Xavier Martínez por todo lo que me ha enseñado, tanto durante este trabajo como durante las asignaturas que ha impartido. Gracias a la confianza que depositó en mi y a su gran dedicación este trabajo ha llegado a buen puerto.

También me gustaría darles las gracias a mi familia y amigos, quienes siempre me han apoyado en todo momento en mis estudios. Especialmente, agradecer a mis padres todo lo que han hecho y hacen por mí. Porque la educación que me han proporcionado tiene un valor incalculable y siempre estaré en deuda con ellos.

Resumen

En los últimos 20 a 30 años aproximadamente, los materiales compuestos han supuesto una auténtica revolución para la tecnología y la ingeniería de materiales. Principalmente, esto se debe a sus excelentes propiedades mecánicas, ligereza, procesabilidad, etc. Por todo esto, las industrias naval y aeronáutica se han convertido en los principales consumidores de estos materiales, siendo la náutica de recreo la más importante.

Más recientemente, a partir del pensamiento ecológico y la preocupación por el medio ambiente, se ha intentado reducir el impacto medioambiental que suponen los compuestos. Estos materiales son difíciles de reciclar y reutilizar, por lo que la gestión de los residuos generados supone un problema a medio y largo plazo. Para solucionar este problema, una propuesta ha sido la de sustituir los materiales compuestos actuales, que son sintéticos, por materiales compuestos naturales (bio-compuestos) como la fibra de lino.

Este documento explica el proceso que se ha seguido para caracterizar o simular un tipo de bio-compuesto de fibras de lino mediante el cálculo numérico. Esta tarea se ha realizado en el marco del proyecto de investigación europeo Eco-Compass [23]. En pocas palabras, este proyecto hace un estudio de la viabilidad de diversos materiales compuestos (más ecológicos que los usados actualmente) con el objetivo de aplicarlos en estructuras secundarias y elementos interiores de aviones.

El trabajo se ha estructurado en 5 capítulos. En primer lugar, se hace una introducción teórica breve a los dos campos de la ingeniería naval que abarca este trabajo: los materiales compuestos y el cálculo numérico de estructuras.

En segundo lugar, se explica el proceso de familiarización con el programa de cálculo utilizado durante el trabajo. Este proceso fue la primera etapa del trabajo.

En tercer lugar, se hace una explicación de las dos teorías utilizadas para la simulación numérica de materiales compuestos.

En cuarto lugar, se explica detenidamente el proceso que se ha seguido para caracterizar el material.

Finalmente, en el último capítulo se exponen las conclusiones a las que se ha llegado con la realización de este trabajo.

Mencionar que como anexo se han presentado los resúmenes de las dos conferencias en las que el profesor Xavier Martínez va a exponer parte de los resultados obtenidos en este TFG.

Abstract

In the last 20 to 30 years approximately, composite materials have been a real revolution for technology and materials engineering. Mainly, this is due to its excellent mechanical properties, lightness, processability, etc. For all this, the naval and aeronautical industries have become the main consumers of these materials, with recreational sailing being the most important.

More recently, from ecological thinking and concern for the environment, an attempt has been made to reduce the environmental impact of the composites. These materials are difficult to recycle and reuse, so the management of the waste generated is a problem in the medium and long term. To solve this problem, one proposal has been to replace the current composite materials, which are synthetic, with natural composite materials (bio-composites) such as linen fiber.

This document explains the process that has been followed to characterize or simulate a type of bio-composite of flax fibers by numerical calculation. This task has been carried out in the framework of the European research project Eco-Compass [23]. In short, this project makes a study of the viability of various composite materials (more ecological than currently used) with the aim of applying them in secondary structures and interior elements of the aeronautical industry.

The work has been structured in 5 chapters. First, a brief theoretical introduction is made to the two fields of naval engineering covered by this work: composite materials and the numerical calculation of structures.

Secondly, the familiarization process with the calculation program used during the work is explained. This process was the first stage of the work.

Third, an explanation is given of the two theories used for the numerical simulation of composite materials.

Fourth, the process that has been followed to characterize the material is thoroughly explained.

Finally, in the last chapter the conclusions that have been reached with the realization of this work are presented.

Mention that the summaries of the two conferences in which Professor Xavier Martínez will present part of the results obtained in this TFG have been presented as an annex.

Tabla de contenidos

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
TABLA DE CONTENIDOS	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	XII

1. INTRODUCCIÓN TEÓRICA	1
--------------------------------	----------

1.1. MATERIALES COMPUESTOS	1
1.1.1. DEFINICIÓN DE MATERIAL COMPUESTO	1
1.1.2. CONCEPTO DE MATRIZ Y REFUERZO	2
1.1.3. LOS MATERIALES COMPUESTOS EN LA CONSTRUCCIÓN NAVAL	4
1.1.4. BIO-COMPUESTOS	6
1.2. CÁLCULO NUMÉRICO DE ESTRUCTURAS	7
1.2.1. ELEMENTOS DE MALLA LINEALES Y CUADRÁTICOS	9

2. FAMILIARIZACIÓN CON EL PROGRAMA DE CÁLCULO (PLCD)	11
---	-----------

2.1. CÁLCULO NUMÉRICO DE LA ESTRUCTURA	11
2.1.1. GEOMETRÍA	11
2.1.2. MATERIAL	11
2.1.3. CONDICIONES DE CONTORNO	12
2.1.4. MALLAS ESTUDIADAS	13
2.1.5. RESULTADOS OBTENIDOS	14
2.2. CÁLCULO ANALÍTICO DE LA ESTRUCTURA	16
2.3. COMPARATIVA DE RESULTADOS	18

3. TEORÍAS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA DE MATERIALES COMPUESTOS	19
---	-----------

3.1. TEORÍA DE MEZCLAS SERIE/PARALELO	19
3.1.1. MODELO CLÁSICO	19
3.1.2. TEORÍA DE MEZCLAS SERIE/PARALELO	22
3.1.3. VERIFICACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LA TEORÍA DE MEZCLAS S-P MEDIANTE PLCD	24

3.2. TEORÍA DE HOMOGENEIZACIÓN O ANÁLISIS MULTIESCALA	26
3.2.1. VERIFICACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LA TEORÍA DE HOMOGENIZACIÓN MEDIANTE PLCd	28
<u>4. CARACTERIZACIÓN DEL BIO-COMPUESTO DE FIBRAS DE LINO</u>	31
4.1. ENSAYO ESTUDIADO	31
4.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES	33
4.3. MODELO NUMÉRICO	34
4.3.1. GEOMETRÍA	34
4.3.2. MATERIAL	35
4.3.3. CONDICIONES DE CONTORNO	37
4.3.4. MALLA SELECCIONADA	38
4.3.5. PRIMEROS RESULTADOS OBTENIDOS	38
4.3.6. CONCLUSIONES	40
4.4. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS FIBRAS DE LINO CURVADAS MEDIANTE EL CÁLCULO MULTIESCALA	41
4.4.1. RESUMEN	41
4.4.2. MODELO NUMÉRICO	41
4.4.3. TEORÍA	44
4.4.4. RESULTADOS OBTENIDOS	45
4.5. CARACTERIZACIÓN FINAL DEL COMPUESTO	47
4.5.1. MODELOS CALCULADOS	47
4.5.2. RESULTADOS FINALES OBTENIDOS	48
<u>5. CONCLUSIONES</u>	51
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	55
<u>ANEXO 1. ABSTRACT CONFERENCIA GLASGOW</u>	57
<u>ANEXO 2. ABSTRACT CONFERENCIA CHINA</u>	59

Lista de Figuras

Figura 1. Representación de matriz y refuerzo [3]	1
Figura 2: curvas tensión (σ) – deformación (ϵ) de un compuesto y sus componentes [1]	2
Figura 3: resistencia a la tracción en función de la orientación de las fibras [2]	3
Figura 4: ejemplos de fieltro de vidrio, tejido de carbono y ensamblado de kevlar [3]	5
Figura 5: velero Araldite	7
Figura 6: elementos hexaédricos lineal y cuadrático [14]	10
Figura 7: vista de la viga en perspectiva	11
Figura 8: esquema del ensayo a flexión de 3 puntos [12]	12
Figura 9: líneas con restricciones	12
Figura 10: puntos con restricciones	12
Figura 11: representación de las tres mallas (1000, 8000 y 13824 elementos)	14
Figura 12: resultados del ensayo a flexión de 3 puntos (vistas desde arriba)	15
Figura 13: resultados del ensayo a flexión de 3 puntos (vistas desde abajo)	15
Figura 14: gráfica comparación de mallas	18
Figura 15: tensión en paralelo [16]	20
Figura 16: muelles en paralelo [20]	20
Figura 17: tensión en serie [16]	21
Figura 18: muelles en serie [20]	21
Figura 19: ejemplo teoría de mezclas serie-paralelo [13]	22
Figura 20: diagrama tensión-deformación en paralelo (eje X)	23
Figura 21: diagrama tensión-deformación en serie (eje Y)	23
Figura 22: diagramas de tensiones en X para el compuesto, fibra y matriz	24
Figura 23: diagramas de tensiones en Y para el compuesto, fibra y matriz	25
Figura 24: representación del procedimiento de cálculo multiescala [12]	26
Figura 25: esquema viga encastada y su diagrama de momentos flectores [19]	28
Figura 26: macro-modelo viga encastada	28

Figura 27: micro-modelo viga encastada	29
Figura 28: tensiones en X del macro-modelo	29
Figura 29: desplazamientos en Y del macro-modelo	29
Figura 30: tensiones en X del micro-modelo del punto de Gauss superior	30
Figura 31: tensiones en X del micro-modelo del punto de Gauss inferior	30
Figura 32: esquema y diagramas de momentos flectores del ensayo a flexión por 4 puntos [19]	31
Figura 33: probeta bajo tensión en el ensayo estudiado. Fuente: DLR	32
Figura 34: probetas después del ensayo. Fuente: DLR	32
Figura 35: gráficas de fuerza (F) – desplazamiento (d) experimental. Fuente: DLR	33
Figura 36: curvas experimentales	33
Figura 37: esquema ensayo a flexión por 4 puntos [17]	34
Figura 38: vista en perspectiva de la geometría del modelo numérico	34
Figura 39: fotografía de las fibras de lino utilizadas en las probetas. Fuente: DLR	35
Figura 40: fotografía de una de las probetas ensayadas. Fuente: DLR	35
Figura 41: distribuciones de orientación de fibras elegidas	36
Figura 42: líneas con restricciones	37
Figura 43: puntos con restricciones	37
Figura 44: malla seleccionada	38
Figura 45: diagrama de tensiones en X resultantes en la probeta (vista superior e inferior)	39
Figura 46: primeros resultados obtenidos	39
Figura 47: obtención de los micro-modelos representativos	41
Figura 48: micro-modelo 1 (vista en alzado y perspectiva)	42
Figura 49: micro-modelo 2 (vista en alzado y perspectiva)	42
Figura 50: superficies de contacto (planos XY, XZ e YZ)	43
Figura 51: superficies de contacto (planos XY, XZ e YZ)	43
Figura 52: diagrama de tensiones en X del micro-modelo 1 (vista en alzado y perspectiva)	45
Figura 53: diagrama de tensiones en X del micro-modelo 2 (vista en alzado y perspectiva)	45

Figura 54: resultados con módulo $E_{f1} = 20,72$ GPa	48
Figura 55: resultados con módulo $E_{f2} = 11,07$ GPa	48

Lista de Tablas

Tabla 1: comparativa de las resinas principales [1]	5
Tabla 2: comparativa de propiedades de diferentes fibras [6] [9]	6
Tabla 3: condiciones de contorno	13
Tabla 4: resultados calibración malla	14
Tabla 5: resultados analíticos.....	17
Tabla 6: condiciones de contorno	37
Tabla 7: resultados del análisis multiescala	46
Tabla 8: modelos calculados.....	47

1. Introducción teórica

En este primer capítulo se hace una breve introducción a los dos campos de la ingeniería naval que abarca principalmente el trabajo: los materiales compuestos y el cálculo numérico de estructuras. Tan solo se mencionan los conceptos de cada campo que son esenciales para el buen entendimiento del trabajo.

1.1. Materiales Compuestos

1.1.1. Definición de material compuesto

Un material compuesto o composite es aquel que está formado por la unión de dos o más materiales, de modo que tiene unas propiedades y características mejores que las de los materiales simples por separado.

En el caso de este trabajo, y en general en la industria naval, se trabaja con materiales compuestos formados por un material de refuerzo y una matriz.

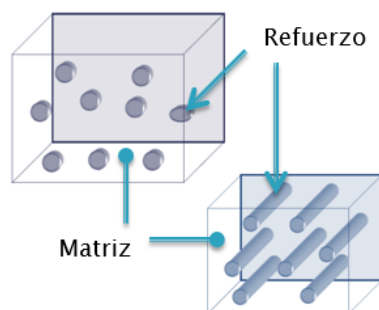


Figura 1. Representación de matriz y refuerzo [3]

1.1.2. Concepto de matriz y refuerzo

Contrariamente a los materiales estructurales isótropos como el aluminio o el acero, los materiales compuestos suelen ser anisótropos, es decir, tienen propiedades mecánicas diferentes en función de la dirección de los esfuerzos a los que se someten. Esto ocurre porque constan de dos materiales diferentes que pueden estar distribuidos de manera no uniforme.

Por un lado, el material de **refuerzo** o fibra es el elemento que le otorga las propiedades mecánicas al composite. Se trata del elemento resistente y rígido del material.

Por el otro, la **matriz** o resina se encarga de unir y compactar las fibras y facilita la transmisión de esfuerzos entre ellas. También tiene una función de protección de las fibras ante elementos externos. Se trata de un material mucho más blando que la fibra y menos resistente.

En la siguiente Figura 2 se puede observar las curvas Tensión (σ) – Deformación (ϵ) de un material compuesto y de sus dos componentes por separado. Se puede ver como la curva del refuerzo tiene una pendiente mucho mayor, ya que se trata de un material muy rígido (admite una gran tensión y se deforma poco). En cambio, la curva de la matriz tiene una pendiente mucho menor, ya que es más blanda (con pequeñas tensiones se deforma mucho).

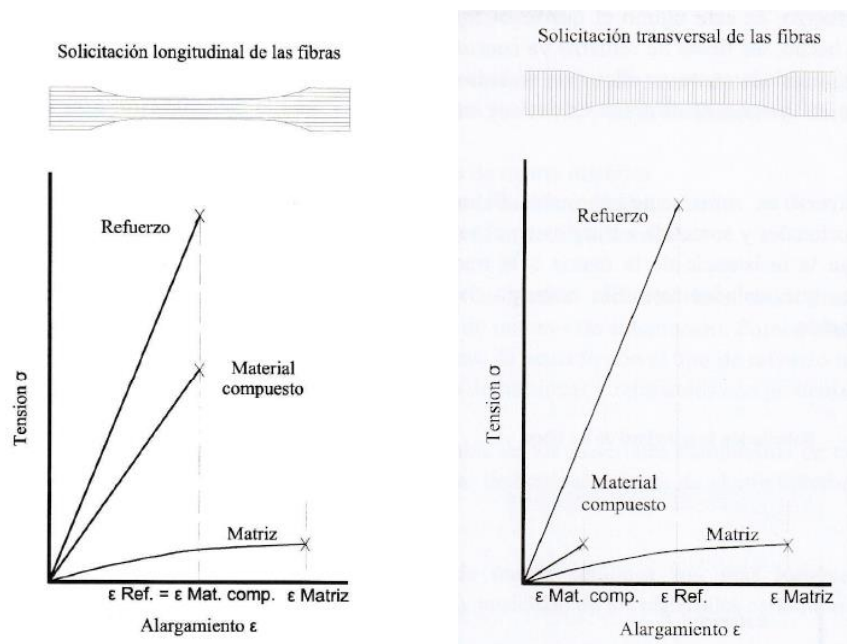


Figura 2: curvas tensión (σ) – deformación (ϵ) de un compuesto y sus componentes [1]

En la parte izquierda se representa la curva del material compuesto con las fibras paralelas a la dirección del esfuerzo de tracción. En cambio, en la parte derecha la dirección de las fibras es perpendicular a la dirección del esfuerzo.

Comparando las curvas del composite en los dos casos se puede observar como en el primero las fibras trabajan de la manera más lógica y eficiente, haciendo que el compuesto tenga la mayor resistencia posible y su rotura dependa de las fibras. En el segundo caso se trata de la opción más desfavorable, por lo que el compuesto tiene una resistencia mucho menor, rompiéndose cuando la tensión exceda la tensión de rotura de la matriz.

Este comportamiento implica que la **orientación** de las fibras en un material compuesto es muy importante y determina completamente su resistencia mecánica. La Figura 3 representa más claramente la variación de la resistencia a la tracción en función del ángulo de orientación de las fibras.

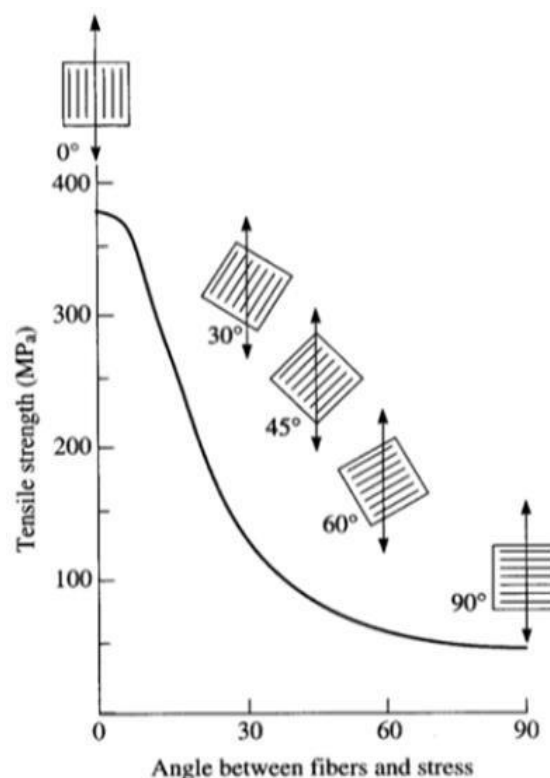


Figura 3: resistencia a la tracción en función de la orientación de las fibras [2]

Otro aspecto a tener en cuenta es la **participación volumétrica de la fibra** (Ψ). Esta es un porcentaje que representa el volumen de fibra presente en el compuesto y se calcula según la ecuación siguiente:

$$\Psi = \frac{V_f}{V_f + V_m} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde,

V_f Volumen de fibra presente en el compuesto

V_m Volumen de matriz presente en el compuesto

Este factor es importante porque determina cuán buenas son las propiedades mecánicas del compuesto. Cuanto mayor sea el porcentaje, mayor cantidad de material resistente tendrá el compuesto, por lo que mejores serán sus propiedades.

Mediante los métodos de producción de materiales compuestos actuales se consiguen porcentajes de entre el 30% al 65% (en masa).

1.1.3. Los materiales compuestos en la construcción naval

La industria naval es uno de los mayores consumidores de materiales compuestos, principalmente en la construcción de embarcaciones de recreo. Las principales **ventajas** que conllevan a ello son:

- Alta resistencia en relación al peso
- Baja densidad
- Resistencia a la corrosión (determinada por el tipo de resina utilizada)
- Flexibilidad de formas
- Buen comportamiento a fatiga
- Baja conductividad eléctrica (buenos aislantes)
- Reducción de costes de mantenimiento

Obviamente, aparte de estas ventajas obtendremos otras propiedades en función de la fibra y resina del composite.

En cuanto a **materiales de refuerzo**, los más utilizados en construcción naval son la fibra de vidrio, fibra de carbono y fibras aramídicas (kevlar). Nótese que las tres son fibras sintéticas. De estas tres, la más utilizada con diferencia es la fibra de vidrio. Asimismo, estas fibras se venden en diferentes estructuras textiles, siendo las más comunes en construcción naval los fieltros (mats), los tejidos (Roving) o los ensamblados (uniaxiales, biaxiales, etc.).

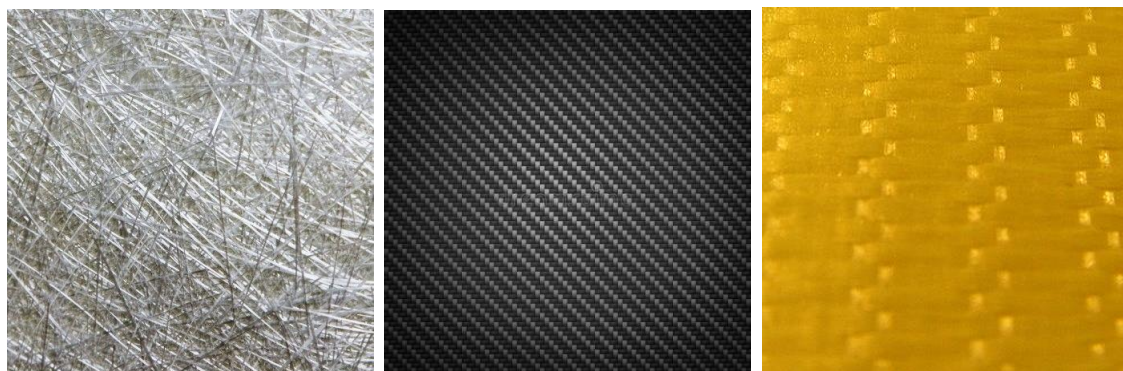


Figura 4: ejemplos de fieltro de vidrio, tejido de carbono y ensamblado de kevlar [3]

Muy resumidamente, la fibra de vidrio es la opción más barata, aunque las fibras de carbono y el kevlar son mucho más resistentes y ligeras, por lo que también son más caras.

Referente a las **matrices**, las más utilizadas en construcción naval son la resina de poliéster, de viniléster y epoxi. En la Tabla 1 puede verse una comparación de sus propiedades. Hay que tener en cuenta que cuanto mejores son éstas, mayor es el precio.

Resina	Densidad	Resistencia a la tracción	Módulo de elasticidad	Contracción volumétrica	Alargamiento a la rotura	Viscosidad
Poliéster	1,22	60/85 MPa	4,2/4,8 GPa	7-9 %	2,5 %	350/1000 cps
Viniléster	1,12	81 MPa	3,3/3,5 GPa	3-6 %	6 %	350/500 cps
Epoxi	1,10	90 MPa	7 GPa	1,5 %	1,5 %	350/900 cps

Tabla 1: comparativa de las resinas principales [1]

1.1.4. Bio-compuestos

Los bio-compuestos son aquellos materiales compuestos que utilizan fibras naturales como material de refuerzo. Algunos ejemplos de estas fibras son el algodón, lino, cáñamo, sisal, plátano, piña, yute, kenaf o coco. Estas fibras se extraen principalmente de tallos, hojas, semillas, cañas y frutas y se usan como relleno o refuerzo de materiales termoplásticos o incluso como refuerzo de resinas termoestables.

Las industrias que más utilizan las fibras naturales son la automotriz y la construcción y la razón principal de su uso es el poco impacto medioambiental que suponen en cuanto a emisiones de CO₂ durante su producción. Asimismo, su utilización es mucho más escasa que la de las fibras sintéticas mencionadas anteriormente, ya que sus propiedades mecánicas son peores.

En la industria naval, el uso de fibras naturales es muy reducido, ya que es mucho más rentable la fibra de vidrio, por ejemplo. En la siguiente table podemos ver una comparativa entre la fibra de lino (con la cual se trabaja más adelante en el trabajo) y las tres fibras sintéticas usadas mayoritariamente en la construcción de embarcaciones de recreo.

Fibra	Densidad [g/cm ³]	Resistencia a la tracción [GPa]	Módulo elástico E [GPa]	Alargamiento a la rotura [%]	Absorción de humedad [%]	Precio aproximado [€/kg]
Lino	1,4	0,3 – 1,5	24 - 80	1,2 – 3,2	7	2 – 4
Vidrio tipo E	2,5 – 2,6	3,4 – 3,5	72 - 73	3,3 – 4,8	0	1 – 3
Carbono HT	1,74 – 1,83	2,6 – 5,0	228 - 238	1,2 – 2,0	0	40 – 50
Kevlar 49	1,45 – 1,47	2,8 – 3,4	120 - 186	1,9 – 2,4	0	40 – 50

Tabla 2: comparativa de propiedades de diferentes fibras [6] [9]

Se puede observar que la fibra de lino tiene unas propiedades muy parecidas a las de la de vidrio. Igualmente, para un precio muy parecido, la fibra de vidrio tiene unas propiedades mecánicas notablemente mejores. Además, el hecho de tener un 7% de absorción de humedad hace que la fibra de lino no sea muy adecuada para el ambiente marino y tenga que protegerse con resinas de alta calidad como el epoxi. Tan solo se recomendaría a embarcaciones de competición que tan solo están en el mar cuando se

navega. Un ejemplo de ello es el *Araldite*, un prototipo de velero mini transat 6.50 cuyo casco está fabricado en un 50% de lino y 50% de carbono [10].



Figura 5: velero Araldite

La única propiedad que tiene el lino mucho mejor que las otras tres es su reducido impacto medioambiental. Esta es la razón por la que se está empezando a fomentar el uso de fibras naturales e incluso residuos de dichas fibras como refuerzo de materiales poliméricos.

1.2. Cálculo numérico de estructuras

Como ya sabemos, la elasticidad de los materiales viene definida por la siguiente ecuación:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Donde,

σ Tensión aplicada ($\sigma = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}}$)

E Módulo de elasticidad o módulo de Young

ε Deformación del material ($\varepsilon = \frac{\Delta \text{ long.}}{\text{long. inicial}}$)

Es decir, el módulo de Young determina cuán rígido es el material. En otras palabras, la pendiente de la curva tensión – deformación (Figura 2).

El cálculo numérico de estructuras se basa en el **Método de Elementos Finitos**, mediante el cual la ecuación anterior se transforma en notación tensorial en:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Donde,

C Matriz de rigidez de la estructura

El principio que define el Método de Elementos Finitos es el **Principio de los Trabajos Virtuales**, que dice que una estructura está en equilibrio (Estática) si el trabajo realizado por las fuerzas externas y un desplazamiento virtual es igual al trabajo realizado por las fuerzas internas y las deformaciones asociadas a ese desplazamiento virtual.

Matemáticamente, este principio se define mediante la siguiente ecuación:

$$\int_V \delta \varepsilon^T \cdot \sigma \cdot dV = \int_V \delta u^T \cdot b \cdot dV + \int_A \delta u^T \cdot q \cdot dA + \sum \delta u_i^T \cdot P_i \quad (4)$$

Para entender mejor este concepto, consultar el libro [18].

Aplicando la ecuación (3) en el Principio de los Trabajos Virtuales, se puede obtener la matriz de rigidez de cada elemento de la estructura y de la estructura entera, lo cual nos permitirá calcular las tensiones y deformaciones.

Para ello, los programas de cálculo numérico (en nuestro caso **PLCd**) funcionan con la ayuda de programas de preproceso y postproceso (en nuestro caso **GiD**).

En resumidas cuentas, el procedimiento a seguir para calcular una estructura es el siguiente:

- En el preprocesador (GiD) se definen la geometría de la estructura, las unidades del modelo, las propiedades del material/es (E , ν , G , Ψ), las capas del laminado, las condiciones de contorno (cómo está fijada la estructura), las cargas o deformaciones aplicadas a la estructura, las gráficas y resultados que quieren obtenerse y la malla que define la estructura (tipo y tamaño de malla).

Cabe mencionar que los elementos de la malla pueden ser de diversos tipos y formas (hexaédricos, tetraédricos, prismáticos, etc.) variando el número de nodos que contienen. Los nodos son los puntos en los cuales se aplican las fuerzas (F) y desplazamientos (d). En cambio, las tensiones (σ) y deformaciones (ε) que se obtienen como resultado se calculan en lo que se denominan puntos de Gauss de cada elemento.

- El programa genera un fichero de cálculo con las matrices de rigidez, de deformación y otra información necesaria. Se deberá revisar este fichero para verificar que calcule como nos interese.
- Se ejecuta el programa de cálculo PLCd con este fichero de cálculo, generando una serie de ficheros de resultados.
- Se visualizan estos resultados de nuevo con GiD (postproceso).

1.2.1.Elementos de malla lineales y cuadráticos

Mencionar que existen dos tipos de elementos de malla en función de cómo es la aproximación que se hace entre sus nodos: aproximación lineal y aproximación cuadrática.

En el caso de los **elementos lineales**, la interpolación que se hace entre cada nodo es lineal (recta), de modo que no es muy exacta.

En cambio, en los **elementos cuadráticos** la interpolación entre los nodos es cuadrática (parábola) y tienen más nodos, lo cual significa una mejor aproximación de la realidad y proporciona unos resultados mucho más precisos. Por otro lado, este aumento de la cantidad de nodos en cada elemento se traduce en un tiempo de cálculo mayor.

Por ejemplo, los elementos hexaédricos lineales tienen 8 nodos, mientras que los elementos hexaédricos cuadráticos tienen 20, por lo que el cálculo será unas 2,5 veces más lento.

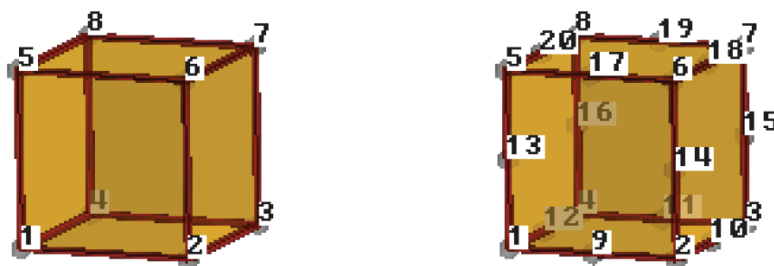


Figura 6: elementos hexaédricos lineal y cuadrático [14]

2. Familiarización con el programa de cálculo (PLCd)

La primera etapa en este trabajo ha sido la de aprender el procedimiento de cálculo con PLCd hasta dominarlo y saber calcular una estructura cualquiera, sin entrar en el cálculo de materiales compuestos. Para ello, se decidió calcular una estructura simple, un ensayo a flexión de 3 puntos de una viga de acero. De este modo, se pueden contrastar los resultados obtenidos numéricamente con los resultados analíticos obtenidos a partir de las ecuaciones de la estática.

2.1. Cálculo numérico de la estructura

2.1.1. Geometría

La viga que se ha estudiado tiene una longitud de 8m y una sección cuadrada de 1m de lado.

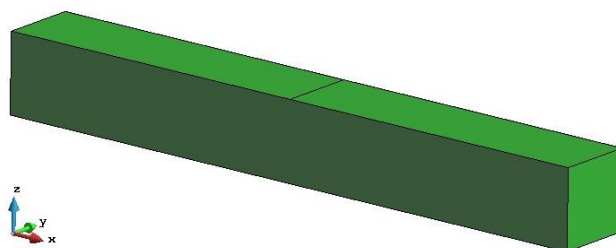


Figura 7: vista de la viga en perspectiva

2.1.2. Material

Se ha decidido utilizar el acero como material para la viga, ya que es isótropo. Sus principales características son:

- Módulo de Young: $E = 210 \text{ GPa} = 2.1 \cdot 10^4 \text{ kN/cm}^2$
- Módulo de Poisson: $\nu = 0.3$

2.1.3. Condiciones de contorno

La siguiente figura representa esquemáticamente el ensayo que se va a calcular, un ensayo a flexión de 3 puntos.

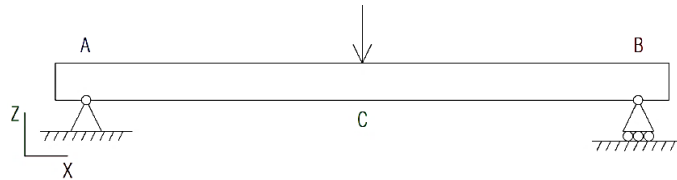


Figura 8: esquema del ensayo a flexión de 3 puntos [12]

En este ensayo, se le aplica una carga vertical a la viga a lo larga de una línea transversal a ella (punto C). La viga está fijada en todas direcciones en el punto A, mientras que en el punto B se deja libre la dirección longitudinal (X) para que la viga pueda encogerse debido a la flexión.

Para representar estas condiciones de contorno en el modelo numérico se han definido 3 líneas y 3 puntos sobre los cuales se aplicarán restricciones. Estos elementos aparecen coloreados en las siguientes figuras.

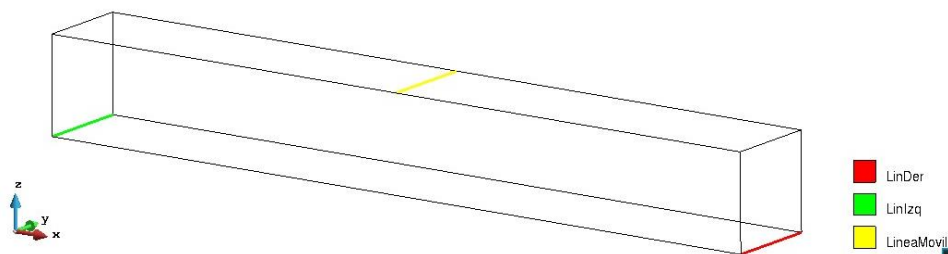


Figura 9: líneas con restricciones

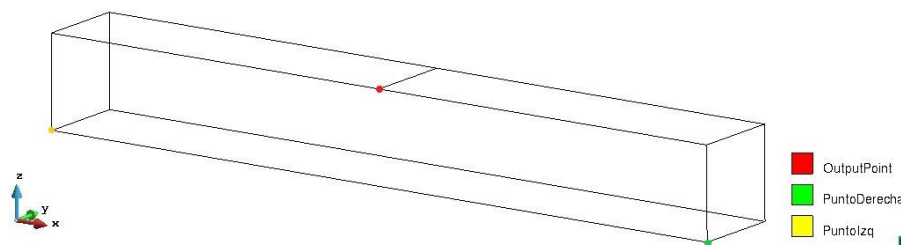


Figura 10: puntos con restricciones

Para simular el comportamiento y las sujeciones de la viga lo más exactamente posible, cada elemento se ha restringido de la siguiente manera:

Elementos	Restricciones
Punto Derecha	Y, Z
Punto Izquierda	X, Y, Z
Línea Derecha	Z
Línea Izquierda	X, Z
Línea Móvil	Z (-0.05)

Tabla 3: condiciones de contorno

El punto y línea de la derecha se dejan libres en X para permitir que la viga se encoja debido a la flexión. Las líneas no se fijan en Y para permitir las deformaciones por el coeficiente de Poisson. En su lugar, tan solo se fija un punto en Y para que la estructura entera no pueda moverse en ese sentido, el punto de la izquierda.

En la línea móvil se aplica un desplazamiento de 5cm equivalente a la fuerza que provoca la flexión. Esta fuerza será la que deberá calcular el programa, concretamente en el OutputPoint, y será el dato con el que podremos comprobar la precisión y validez del modelo numérico.

2.1.4. Mallas estudiadas

Para demostrar que a medida que se disminuye el tamaño de los elementos se obtienen mejores resultados, se ha calculado la estructura en 3 tamaños de elemento diferentes. Para cada tamaño de elemento se ha calculado la estructura con elementos lineales y con elementos cuadráticos para poder comprobar la diferencia en los resultados. Esto significa que se ha calculado la estructura con 6 mallas distintas.

Mediante la siguiente figura se puede visualizar el tamaño y número de elementos de las mallas.

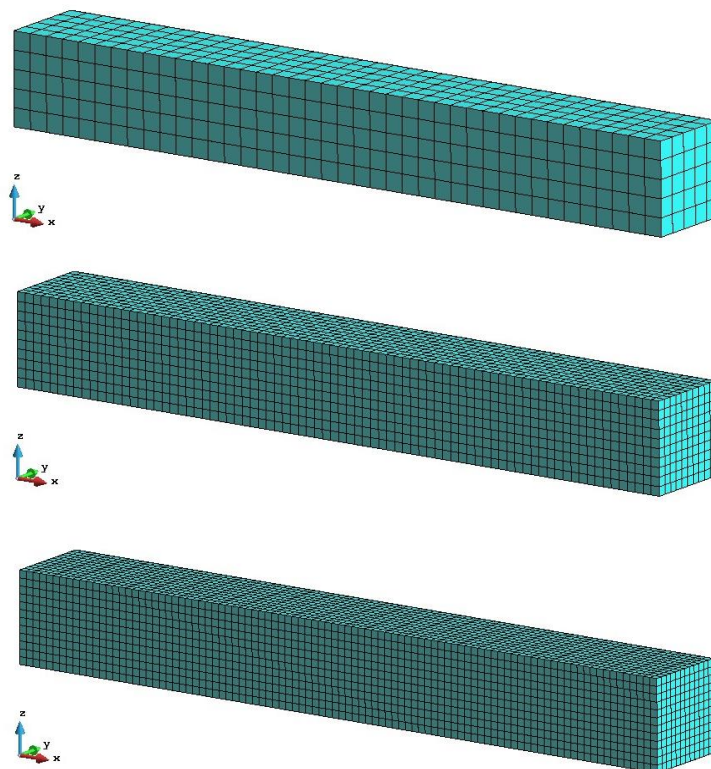


Figura 11: representación de las tres mallas (1000, 8000 y 13824 elementos)

2.1.5.Resultados obtenidos

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para cada malla. La fuerza (F) corresponde a la fuerza necesaria para provocar ese desplazamiento de 5cm que se ha determinado. Aparece también el tiempo que ha tardado el programa en calcular la estructura.

Malla	Tipo elemento	Nº elementos	F [kN]	Tiempo cálculo [min]
1	Lineal	1000	857,68	0:07
2	Lineal	8000	849,52	1:00
3	Lineal	13824	845,22	1:46
4	Cuadrático	1000	844,92	1:00
5	Cuadrático	8000	838,57	9:25
6	Cuadrático	13824	837,13	17:47

Tabla 4: resultados calibración malla

En las siguientes dos figuras se puede ver la representación de los resultados en el postproceso. Concretamente, se representan las tensiones en el eje X, las cuales son las mayores.

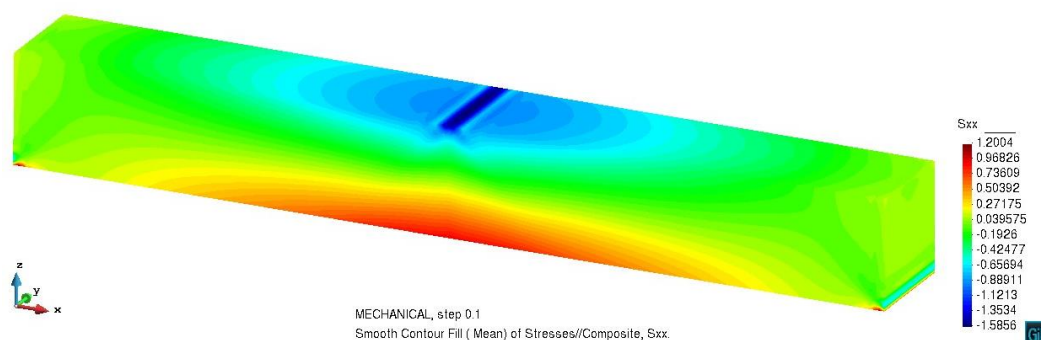


Figura 12: resultados del ensayo a flexión de 3 puntos (vistas desde arriba)

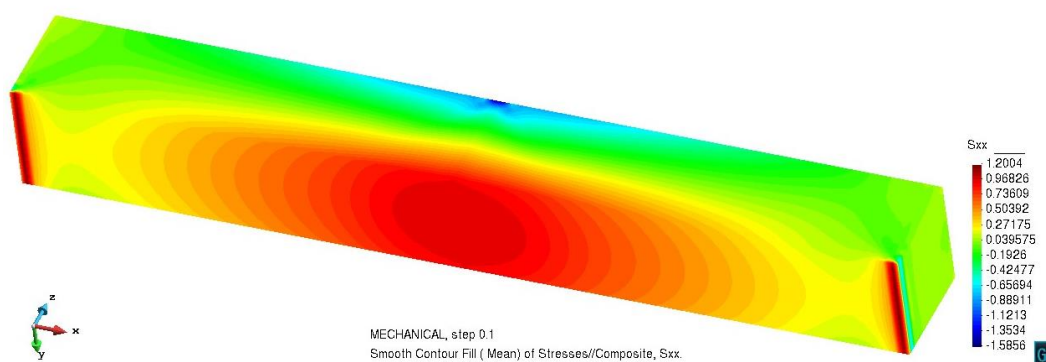


Figura 13: resultados del ensayo a flexión de 3 puntos (vistas desde abajo)

Se puede observar que en las 3 líneas con condiciones de contorno se produce una gran concentración de tensiones, debido a que se aplican fuerzas en superficies muy pequeñas. Concretamente, en la línea de aplicación de la fuerza se produce una compresión de $-1,58\text{kN/cm}^2$ (azul) y en las líneas laterales de los dos apoyos se produce una tracción de $1,20\text{kN/cm}^2$ (rojo).

Las tensiones que aparecen en estas 3 zonas no se tienen en cuenta, ya que en el ensayo real no se producen porque las fuerzas no se aplican en una línea sino en una pequeña superficie de contacto. De este modo, se ha determinado que la zona con mayor tensión es la parte central inferior de la viga (en rojo en la Figura 13), en la cual se produce una tracción de **$0,97\text{kN/cm}^2$** .

2.2. Cálculo analítico de la estructura

El cálculo analítico de la viga se ha realizado a partir de las ecuaciones de la estática consultadas en un prontuario de resistencia de materiales [15].

Para este ensayo de flexión se definen las siguientes ecuaciones:

$$\delta \max = \frac{F \cdot L^3}{48EI_y} \quad (5)$$

$$\sigma \max = \frac{M_F \cdot z}{I_y} \quad (6)$$

$$I_y = \frac{l^4}{12} \quad (7)$$

$$M_F = \frac{F \cdot L}{4} \quad (8)$$

Donde,

$\delta \max$	Deformación máxima (flecha)
F	Fuerza aplicada
L	Longitud entre los apoyos
E	Módulo de elasticidad o módulo de Young
I_y	Momento de inercia de la sección transversal cuadrada respecto de la línea neutra
$\sigma \max$	Tensión máxima adquirida
M_F	Momento flector máximo
z	Altura máxima de la sección transversal desde la línea neutra ($z = \frac{l}{2}$)
l	Lado de la sección cuadrada

A partir de estas ecuaciones se han obtenido los siguientes resultados:

F	835,50	kN
L	800	cm
I	100	cm
z	50	cm
E	2,10E+04	kN/cm ²
I _y	8,33E+06	cm ⁴
M _f	166800	kN·cm
R	417,00	kN
σ máx.	1,00	kN/cm ²
δ máx.	0,05	cm

Tabla 5: resultados analíticos

En pocas palabras, esto significa que para obtener la deformación de 5cm en el centro de la viga, hay que aplicar una fuerza de **835,5kN**.

Mencionar también que la tensión máxima obtenida de 1,00kN/cm² es muy parecida a la tensión máxima obtenida numéricamente (0,97kN/cm²).

2.3. Comparativa de resultados

En la siguiente gráfica se han representado el resultado analítico que se acaba de mencionar y los resultados numéricos de cada una de las 6 mallas calculadas (ver Tabla 4).

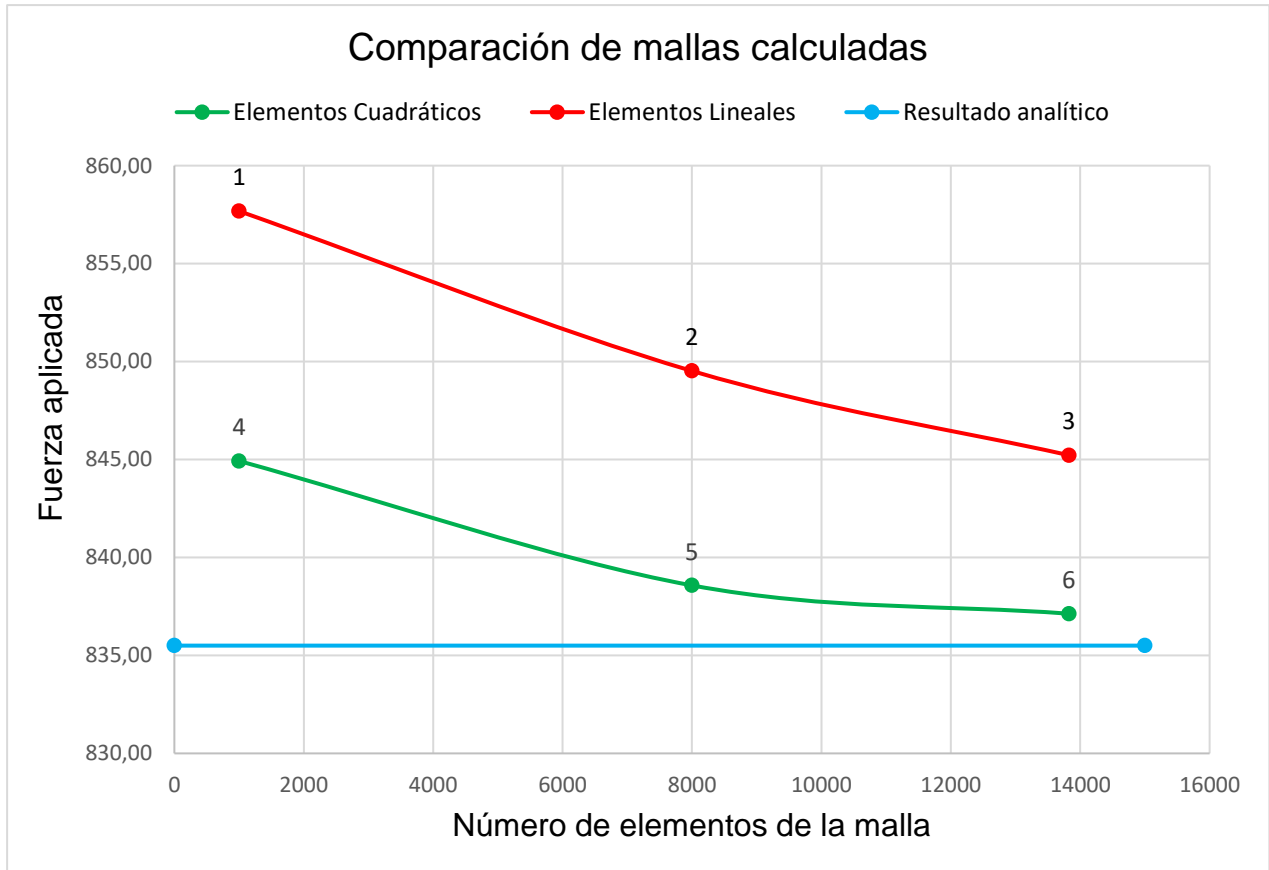


Figura 14: gráfica comparación de mallas

Como puede verse, ambos resultados tienden a estabilizarse acercándose a la solución analítica. Además, tal y como se ha comentado en el capítulo anterior (0), los elementos cuadráticos proporcionan resultados mucho más precisos y cercanos a la realidad. También puede verse que los elementos cuadráticos aumentan el tiempo de cálculo de la estructura, ya que tienen muchos más nodos.

Lógicamente, a medida que se refina la malla, los resultados son más precisos, pero también se aumenta el tiempo de cálculo. En este caso se podría aceptar la malla 5, cuyo tiempo de cálculo (9min 25seg) es prácticamente la mitad que en la malla 6 (17min 47seg), obteniendo un resultado muy parecido (ver Tabla 4).

3. Teorías de simulación numérica de materiales compuestos

En este tercer capítulo se explican las dos teorías más importantes que existen para simular el comportamiento de los materiales compuestos mediante métodos numéricos. Estas dos teorías serán las que se utilizarán en el siguiente capítulo para caracterizar un tipo de material compuesto con fibras naturales. La formulación utilizada se ha extraído de [16].

En este capítulo se van a utilizar ciertos subíndices y superíndices en la formulación, cuyo significado se resume a continuación:

- | | |
|----------------|--------------------------------|
| - c: compuesto | - s: en serie |
| - f: fibra | - p: en paralelo |
| - m: matriz | - k: participación volumétrica |

3.1. Teoría de mezclas serie/paralelo

La teoría de mezclas serie/paralelo consta de una formulación que puede obtener el comportamiento del material compuesto a partir de las características (propiedades mecánicas, orientación, participación volumétrica, etc.) de sus componentes: fibra y matriz.

Antes de explicar esta teoría, se deben entender las dos teorías en las cuales se basa, la teoría clásica y la teoría inversa.

3.1.1. Modelo clásico

Este primer modelo trata el compuesto desde una perspectiva macroescalar, basándose en la mecánica de medios continuos. Para ello se tienen en cuenta las siguientes suposiciones:

- Cada volumen infinitesimal que constituye el material compuesto contiene un número finito de materiales componentes (fibra y matriz).

- Cada uno de estos componentes contribuye proporcionalmente a su participación volumétrica en el compuesto.
- El volumen de estos elementos constituyentes es mucho más pequeño que el del compuesto.

A partir de estas premisas, se definen las siguientes dos teorías:

- Teoría de mezclas clásica:

Trata el compuesto como si se le aplicara una tensión en la dirección paralela a la orientación de las fibras.

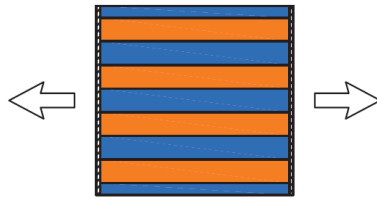


Figura 15: tensión en paralelo [16]

De este modo, la tensión y deformación del compuesto, que como se ha visto en la ecuación (3) se relacionan con la matriz de rigidez de la estructura, se definen como:

$$\varepsilon^c = \varepsilon^f = \varepsilon^m \quad (9)$$

$$\sigma^c = k^f \cdot \sigma^f + k^m \cdot \sigma^m \quad (10)$$

Es decir, la deformación es la misma para el compuesto y para sus componentes, en cambio, la tensión es proporcional a la participación volumétrica de cada componente.

Para visualizar mejor este concepto, se puede entender como el funcionamiento de dos muelles en paralelo (Figura 16). Al aplicar una fuerza, los dos muelles se deforman igual pero el muelle más rígido (k_2) adquirirá una tensión mayor que el muelle más blando (k_1). En esta analogía el muelle rígido sería la fibra y el blando, la matriz.

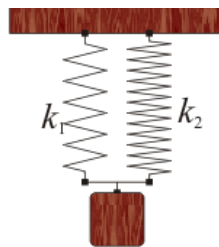


Figura 16: muelles en paralelo [20]

- Teoría de mezclas inversa:

En la teoría de mezclas inversa ocurre lo contrario.

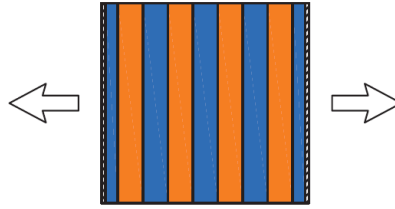


Figura 17: tensión en serie [16]

Al tener las fibras en serie (en dirección perpendicular a la tensión), la tensión y deformación quedan definidas como:

$$\sigma^c = \sigma^f = \sigma^m \quad (11)$$

$$\varepsilon^c = k^f \cdot \varepsilon^f + k^m \cdot \varepsilon^m \quad (12)$$

Es decir, la tensión será la misma para el compuesto y para sus componentes, mientras que la deformación será proporcional a la participación volumétrica de cada componente.

En este caso, la analogía de los muelles quedaría como en la siguiente figura. Ambos muelles tendrían una tensión igual, pero el muelle blando (k_1) se deformaría mucho más que el muelle rígido (k_2).

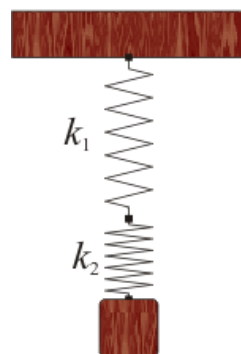


Figura 18: muelles en serie [20]

3.1.2. Teoría de mezclas serie/paralelo

Esta teoría unifica las dos teorías explicadas anteriormente, de modo que el comportamiento del compuesto se representa de una manera más realista. Esto significa que se aplicarán las ecuaciones de la teoría clásica para las tensiones paralelas a la dirección de las fibras, y las ecuaciones de la teoría inversa para las tensiones perpendiculares a la dirección de las fibras.

Esto significa que, al crear un modelo numérico de una estructura, habrá que determinar cuál es la dirección de las fibras. Es decir, el programa necesita saber cuáles son las direcciones en serie y cuales son en paralelo para aplicar las ecuaciones correspondientes.

Para ello, se hace la suposición de que los componentes del compuesto están unidos perfectamente.

Este concepto puede entenderse mejor con el siguiente ejemplo. Supongamos que se tiene una probeta de material compuesto con las fibras orientadas longitudinalmente en el eje X.

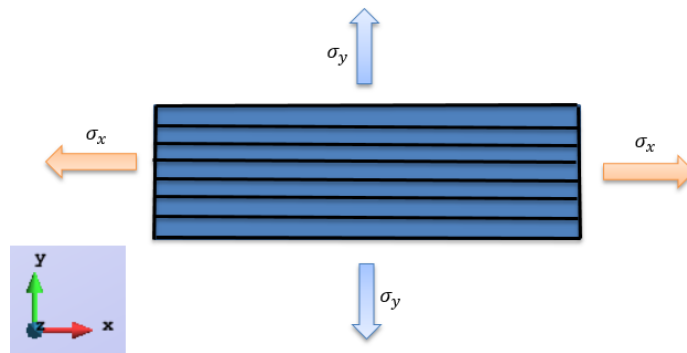


Figura 19: ejemplo teoría de mezclas serie-paralelo [13]

En este caso, habría que definir como dirección en **paralelo** el eje X, por lo que sus tensiones y deformaciones quedarían definidas por las ecuaciones (9) y (10), de la teoría clásica. Su diagrama tensión – deformación sería el siguiente:

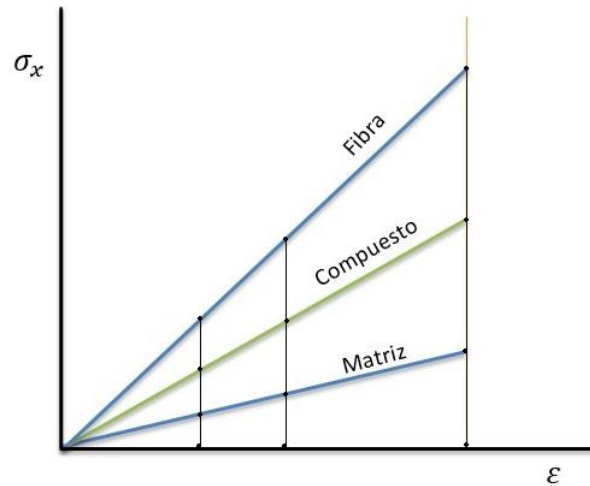


Figura 20: diagrama tensión-deformación en paralelo (eje X)

En cambio, la dirección en **serie** sería el eje Y, por lo que las tensiones y deformaciones quedarían definidas por las ecuaciones (11) y (12), de la teoría inversa. Su diagrama tensión – deformación sería el siguiente:

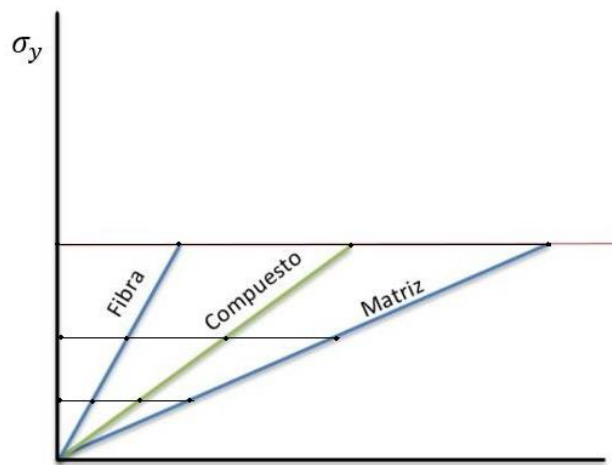


Figura 21: diagrama tensión-deformación en serie (eje Y)

3.1.3. Verificación y visualización de la teoría de mezclas S-P mediante PLCd

Para aprender a utilizar esta teoría con PLCd y comprobar que los resultados cumplen con las ecuaciones descritas, se ha decidido calcular una estructura de prueba. Concretamente, se ha calculado la misma estructura que en el apartado 2.1 (ensayo a flexión por 3 puntos de una viga).

La geometría, condiciones de contorno y malla son las mismas. Tan solo se ha cambiado el material, que en este caso será un material compuesto de fibras de carbono y resina epoxi. La participación volumétrica de la fibra es del 60%, mientras que la de la matriz es del 40%.

Las fibras se han orientado todas a 0° , igual que en el ejemplo de la Figura 19. Por tanto, el eje X será la dirección en paralelo y el eje Y, en serie.

PLCd permite calcular resultados tanto para el compuesto entero como para cada componente, lo cual ayudará a entender la teoría.

En la siguiente figura aparecen los diagramas de **tensiones en el eje X** del compuesto, de la fibra y de la matriz:

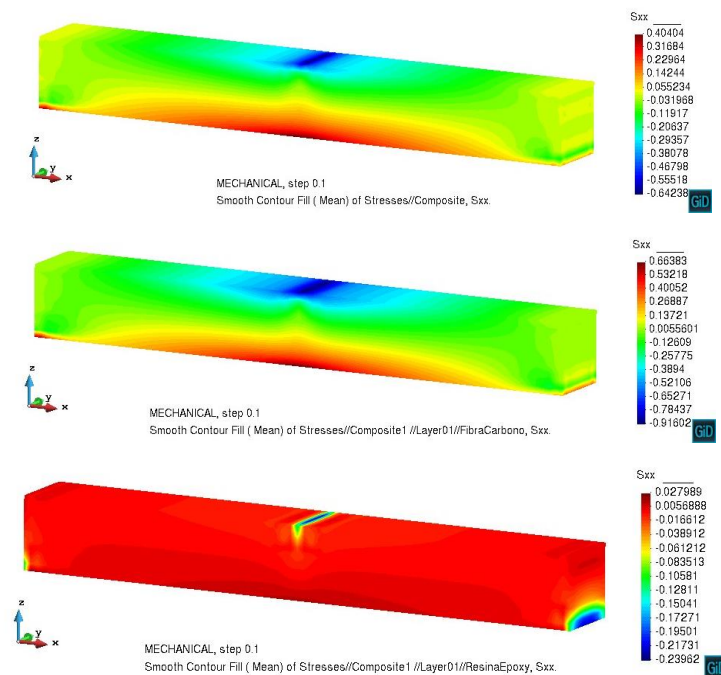


Figura 22: diagramas de tensiones en X para el compuesto, fibra y matriz

Si nos fijamos por ejemplo en los valores máximos a tracción, se ha obtenido:

$$\sigma^c_x = 0,404 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma^f_x = 0,664 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma^m_x = 0,028 \text{ kN/cm}^2$$

Estos valores cumplen con la ecuación (10), que define la tensión del compuesto en la dirección en paralelo, con un pequeño error debido a la interpolación que realiza GiD para la visualización de los resultados:

$$\sigma^c = k^f \cdot \sigma^f + k^m \cdot \sigma^m = 0,664 \cdot 0,6 + 0,028 \cdot 0,4 = 0,409 \text{ kN/cm}^2$$

Además, si nos fijamos en las **tensiones en el eje Y**, se obtienen diagramas y valores exactamente iguales para el compuesto, la fibra y la matriz. Esto demuestra que se está cumpliendo la ecuación (11), que dice que en la dirección en serie las tensiones son iguales.

$$\sigma^c = \sigma^f = \sigma^m = 0,037 \text{ kN/cm}^2$$

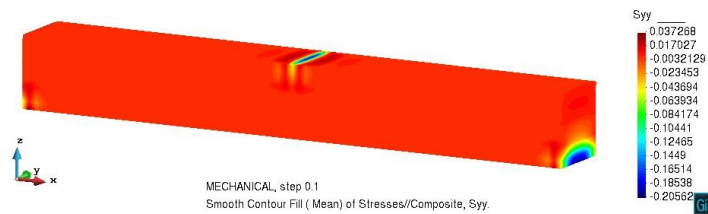


Figura 23: diagramas de tensiones en Y para el compuesto, fibra y matriz

3.2. Teoría de Homogeneización o Análisis Multiescala

La teoría de homogeneización consiste en analizar el comportamiento de un material compuesto a partir de dos escalas, una escala superior o macro y una escala inferior o micro.

Para calcular la estructura, este método sustituye la ecuación constitutiva del material compuesto por un **micro-modelo**, que es un volumen representativo del compuesto. De este modo, el comportamiento de la estructura viene definido por el **macro-modelo**, mientras que el comportamiento del material lo define el micro-modelo.

Este método es muy útil, ya que permite calcular estructuras de compuestos cuya micro-estructura es demasiado compleja como para describirla con ecuaciones constitutivas simples como las que se utilizarían en materiales isótropos como el acero o el aluminio. Además, permite caracterizar fallos de los materiales compuestos referentes a la interacción de sus componentes, como pueden ser roturas de la matriz o la fibra, desalineaciones de las fibras, etc.

El procedimiento de cálculo que sigue PLCd en este método se basa en aplicar al micro-modelo las cargas que se obtienen del comportamiento estructural del macro-modelo. Para conseguir esto, del macro-modelo se obtiene un campo de deformaciones (ε) que se transforma en un campo de desplazamientos (D) que se aplica al micro-modelo. A partir de este modelo se obtiene el campo de fuerzas (F) correspondientes al desplazamiento definido. Finalmente, se transforma este campo de fuerzas en un campo de tensiones (σ) que corresponden al macro-modelo.

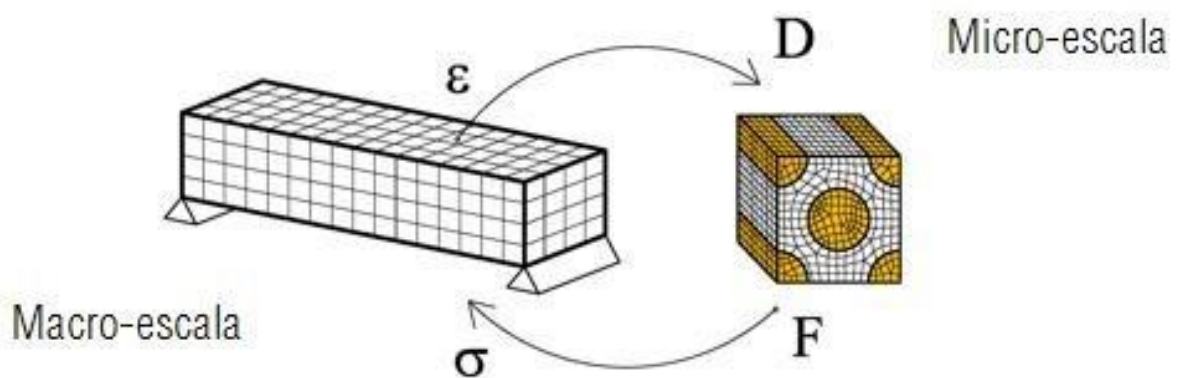


Figura 24: representación del procedimiento de cálculo multiescala [12]

Para que este método funcione es esencial aplicar al micro-modelo unas **condiciones de contorno periódicas**. Estas condiciones de contorno aseguran la concordancia de las deformaciones del micro-modelo con las deformaciones de los micro-modelos que lo rodean. Es decir, sirven para que todas las estructuras micro se deformen ajustándose unas con otras para que no aparezcan espacios vacíos o superposiciones. En el capítulo siguiente se verá cómo se consigue obtener estas condiciones de contorno periódicas.

Mencionar que, con la capacidad de cálculo de los ordenadores actuales, realizar una simulación de una gran estructura mediante la teoría de homogenización todavía tiene un coste computacional (tiempo de cálculo) bastante alto, por lo que no se utiliza. Sin embargo, gracias a los avances en capacidad de cálculo de los ordenadores, esta teoría está empezando a ganar protagonismo.

3.2.1. Verificación y visualización de la teoría de homogenización mediante PLCd

Para visualizar y entender mejor esta teoría y su manejo con el programa, se decidió calcular una estructura simple. Concretamente, se calculó una viga encastada (completamente fijada) en un extremo con una carga vertical hacia abajo en el otro extremo.

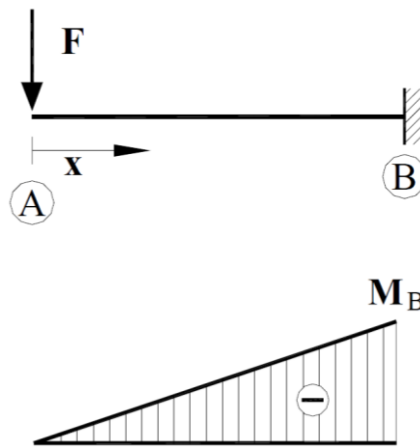


Figura 25: esquema viga encastada y su diagrama de momentos flectores [19]

Las condiciones de contorno de la estructura, por tanto, son muy simples. Basta con fijar en todas direcciones la superficie transversal de la derecha (B) y aplicar el desplazamiento verticalmente hacia abajo en la superficie transversal de la izquierda (A). El macro-modelo es una viga prismática de sección cuadrada. En cambio, el micro-modelo es un cubo de matriz (azul) con la fibra atravesándolo longitudinalmente por el centro (cilindro amarillo).

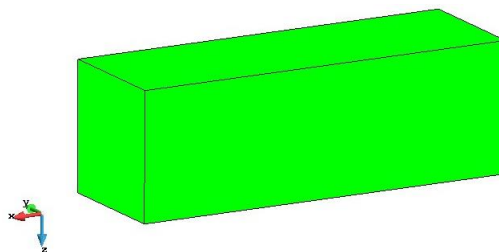


Figura 26: macro-modelo viga encastada

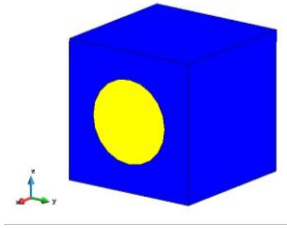


Figura 27: micro-modelo viga encastada

Resultados obtenidos:

En cuanto al **macro-modelo**, los resultados han sido completamente lógicos. Por ejemplo, las tensiones en el eje X (Figura 28) son las mayores y lógicamente en la parte superior de la viga aparece tracción (186 MPa), mientras que en la parte inferior aparece compresión (-186 MPa). Además, la tensión es máxima cuanto más nos acercamos al extremo fijado (derecha), ya que es la zona con un mayor momento flector (ver diagrama de momentos flectores Figura 25).

También se puede observar en el diagrama de desplazamientos en el eje Y (Figura 29) las consecuencias del coeficiente de Poisson, que hace que la sección transversal de la viga se estreche.

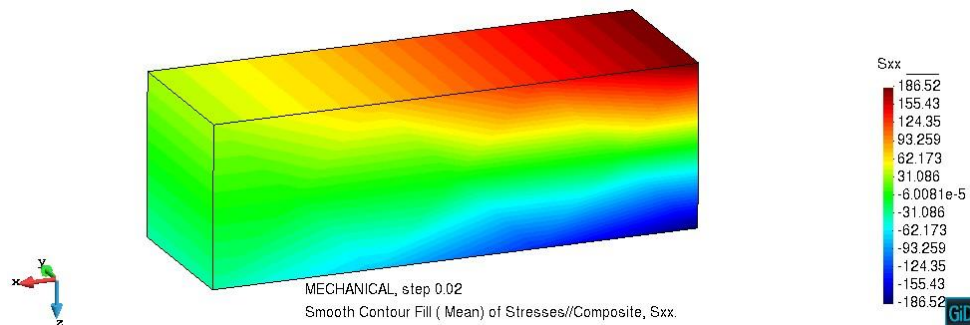


Figura 28: tensiones en X del macro-modelo

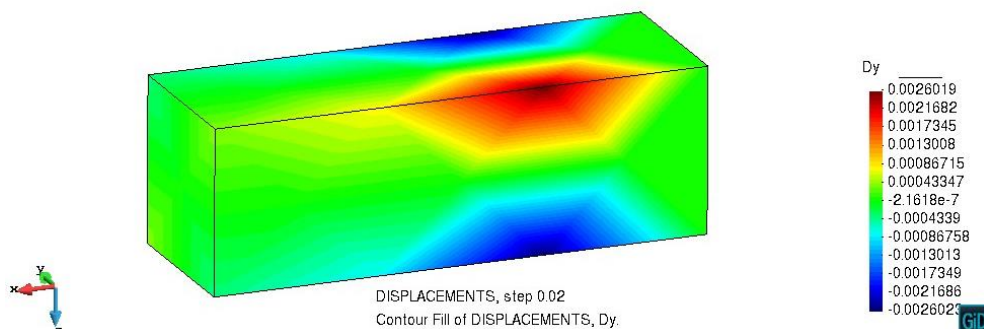


Figura 29: desplazamientos en Y del macro-modelo

Por otro lado, se ha decidido calcular resultados del **micro-modelo** en dos puntos de Gauss de la viga, uno en la parte superior y uno en la inferior.

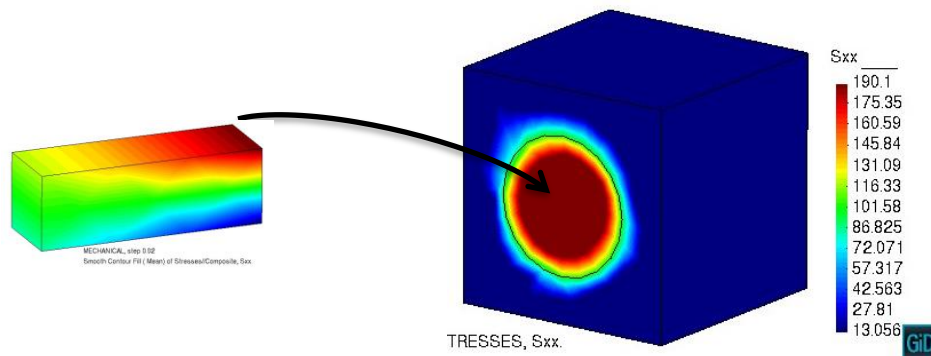


Figura 30: tensiones en X del micro-modelo del punto de Gauss superior

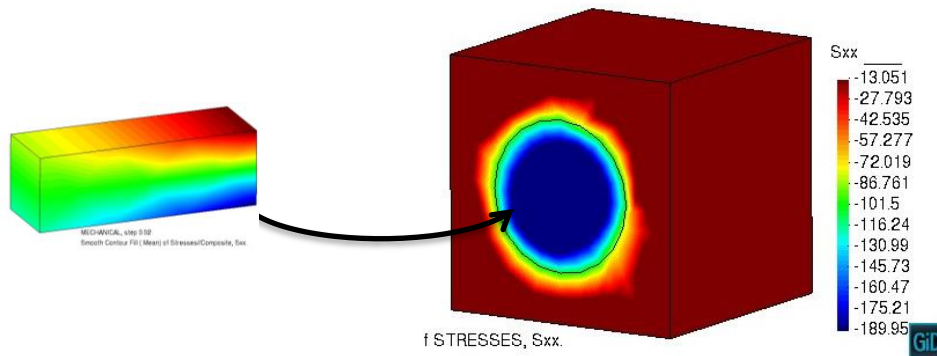


Figura 31: tensiones en X del micro-modelo del punto de Gauss inferior

Como es lógico, el micro-modelo perteneciente al punto de Gauss superior está trabajando a tracción, mientras que el inferior trabaja a compresión.

Además, puede observarse que el elemento que adquiere mayor tensión (190 MPa) en ambos casos es la fibra, ya que es el elemento resistente y más rígido. En cambio, la matriz, que es mucho más blanda, adquiere mucha menos tensión (13 MPa).

4. Caracterización del bio-compuesto de fibras de lino

En este cuarto capítulo se explica el proceso que se ha seguido para simular numéricamente el comportamiento de un tipo de material compuesto con fibras de lino. Se explica cronológicamente, de modo que puede verse todo el proceso de ensayo y error que se ha seguido hasta llegar a la solución esperada.

En pocas palabras, para simular el material se ha hecho un modelo numérico de un tipo de ensayo de resistencia de materiales del cual se tienen los resultados experimentales. De este modo, mediante un proceso de ensayo y error se ha llegado al punto de obtener unos resultados numéricos muy parecidos a los resultados experimentales. Para todo esto, se ha utilizado el programa de cálculo numérico PLCd implementando las dos teorías explicadas en el capítulo anterior (teoría de mezclas serie-paralelo y teoría de homogenización o análisis multiescala).

4.1. Ensayo estudiado

El ensayo que se ha estudiado es un ensayo a flexión por 4 puntos, que es como el del capítulo 2 pero aplicando la fuerza en dos puntos en lugar de solo uno. Esto se hace para no concentrar la tensión máxima en un solo punto, sino en una zona más grande, para que así la probeta rompa por su punto más débil. Como se puede ver en la siguiente figura, la zona con el máximo momento flector es la comprendida entre los dos puntos de aplicación de las fuerzas (C y D).

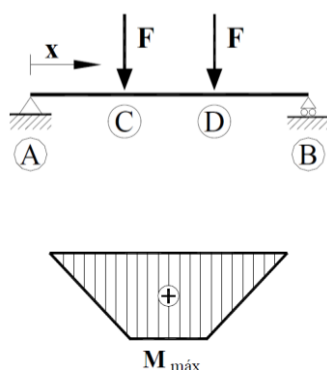


Figura 32: esquema y diagramas de momentos flectores del ensayo a flexión por 4 puntos [19]

En la siguiente figura puede verse el ensayo realizado a una de las probetas. En ella aparece en la parte superior los dos puntos de aplicación de la fuerza y en la parte inferior, el dispositivo de medición del desplazamiento vertical.



Figura 33: probeta bajo tensión en el ensayo estudiado. Fuente: DLR

Como se ha mencionado antes, en este ensayo no se concentra la tensión máxima en un punto sino en una zona más extensa, por lo que las probetas no siempre rompen exactamente por el centro. Esto puede verse en la siguiente fotografía de las 5 probetas después del ensayo.



Figura 34: probetas después del ensayo. Fuente: DLR

4.2. Resultados experimentales

Los resultados experimentales obtenidos a partir de este ensayo (realizado en el Centro Aeroespacial Alemán DLR que colabora con el proyecto Eco-Compass) están representados en la siguiente gráfica:

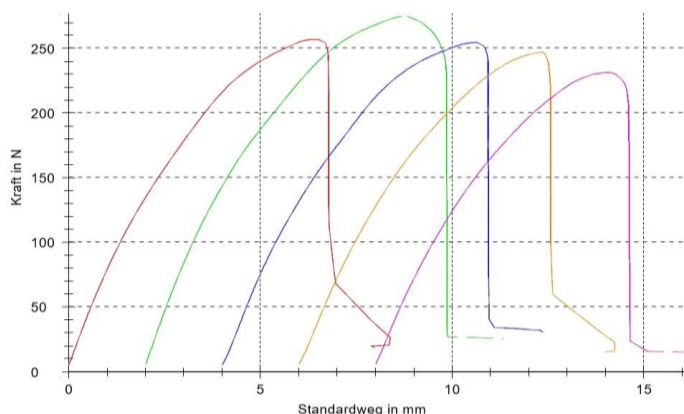


Figura 35: gráficas de fuerza (F) – desplazamiento (d) experimental. Fuente: DLR

Esta gráfica representa el desplazamiento de la probeta en su centro en función de la fuerza aplicada. Concretamente, aparecen las gráficas de las 5 probetas ensayadas en colores diferentes. Como se puede observar, la pendiente de la curva es bastante constante al principio, en el rango lineal que nos interesa.

A partir de estas curvas se ha determinado gráficamente la pendiente inicial de cada una, que como sabemos, representa la rigidez del material. Estos valores se han representado todos juntos en un conjunto de rectas. Por tanto, el objetivo de la simulación será crear un modelo numérico cuya rigidez se aproxime al máximo a estas 5 rectas.

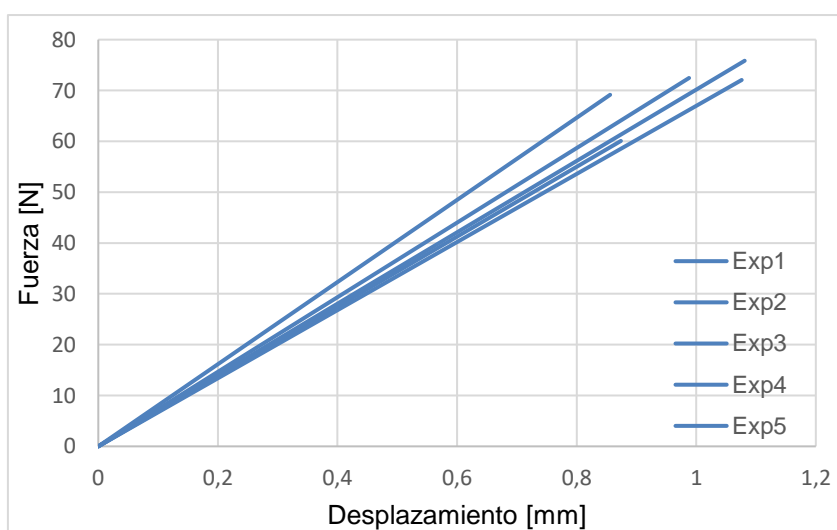


Figura 36: curvas experimentales

4.3. Modelo numérico

4.3.1. Geometría

Las probetas analizadas tienen 60mm de longitud, 15mm de anchura y 3mm de espesor.

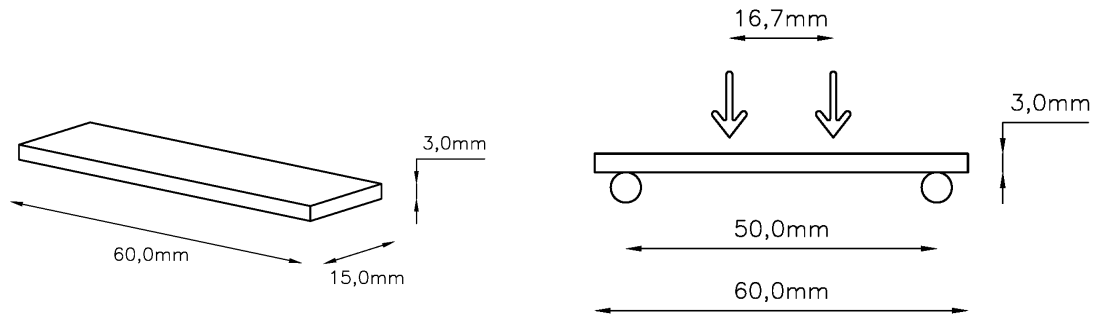


Figura 37: esquema ensayo a flexión por 4 puntos [17]

En la geometría del modelo numérico se ha decidido dejar la longitud en 50mm, ya que los dos extremos sobrantes después de los apoyos no aportan nada. Además, como puede verse en la Figura 38, se han añadido dos elementos en la zona de aplicación de las fuerzas (color rojo).

Estos elementos se definirán de un material blando (sólo resina) de modo que servirán para disminuir la concentración de tensiones, ya que en lugar de aplicarse la fuerza en una línea de la probeta se estará aplicando en una superficie. Esto reproduce bastante bien la realidad del ensayo, ya que como puede verse en la Figura 33, las dos piezas metálicas que aplican la fuerza tienen la punta muy redondeada.

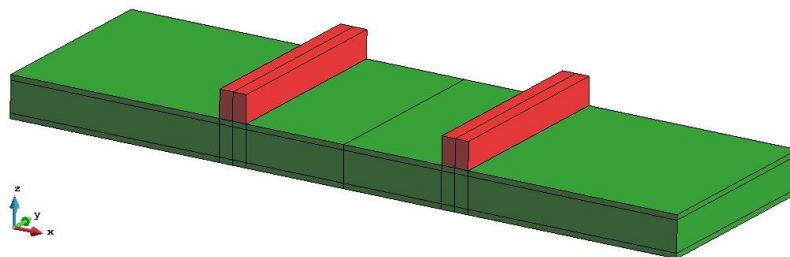


Figura 38: vista en perspectiva de la geometría del modelo numérico

4.3.2. Material

El material de refuerzo utilizado en estas probetas es la **fibra de lino**.

Se trata de una estructura textil un tanto especial, ya que es mucho menos uniforme que las fibras comunes de vidrio o de carbono. Tiene una apariencia muy parecida a la lana, como puede verse en la siguiente figura:



Figura 39: fotografía de las fibras de lino utilizadas en las probetas. Fuente: DLR

A este tipo de fibras se les ha dado una cierta orientación horizontal (0°) mediante lo que se llama un dispositivo de cardado o *carding device* en inglés. Esta máquina consta de una serie de rodets concéntricos con púas que van estirando las fibras hasta conseguir orientarlas ligeramente.

En la práctica, como puede verse en la fotografía, las fibras están bastante curvadas y tienen una orientación muy aleatoria. Estos dos factores determinarán el comportamiento del compuesto, como se verá más adelante.

En cuanto a la matriz, se ha utilizado **resina epoxi**. La siguiente fotografía muestra la probeta resultante ensayada:

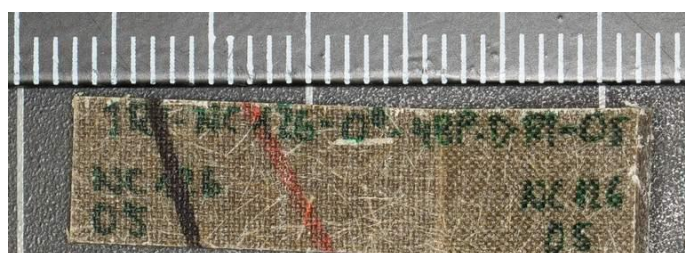


Figura 40: fotografía de una de las probetas ensayadas. Fuente: DLR

La participación volumétrica de la fibra es del 27,5% (obtenida a partir de los datos de DLR)

Las propiedades de la fibra, se han consultado en [7] y [8], mientras que las de la resina se han obtenido a partir de la ficha técnica correspondiente. Son las siguientes:

- Fibra de lino: $E_x = 50 \text{ GPa}$; $E_y = E_z = 8 \text{ GPa}$; $\nu = 0,4$
- Resina epoxi: $E_x = E_y = E_z = 2,7 \text{ GPa}$; $\nu = 0,36$

Este material se ha calculado utilizando la **teoría de mezclas serie-paralelo** (apartado 3.1).

En cuanto a la orientación de las fibras, se ha decidido que para simular el proceso de cardado de las fibras se debería aplicar una **distribución normal** centrada en la dirección horizontal (0°). De este modo, un 18% de las fibras están orientadas a 0° y a medida que este ángulo se vuelve más perpendicular, su participación disminuye.

También se ha decidido calcular la estructura con una **distribución aleatoria y homogénea** de las fibras, es decir, que todas las orientaciones tienen la misma participación (7,7%). Así se podrán contrastar los resultados.

La siguiente gráfica muestra estas dos distribuciones:

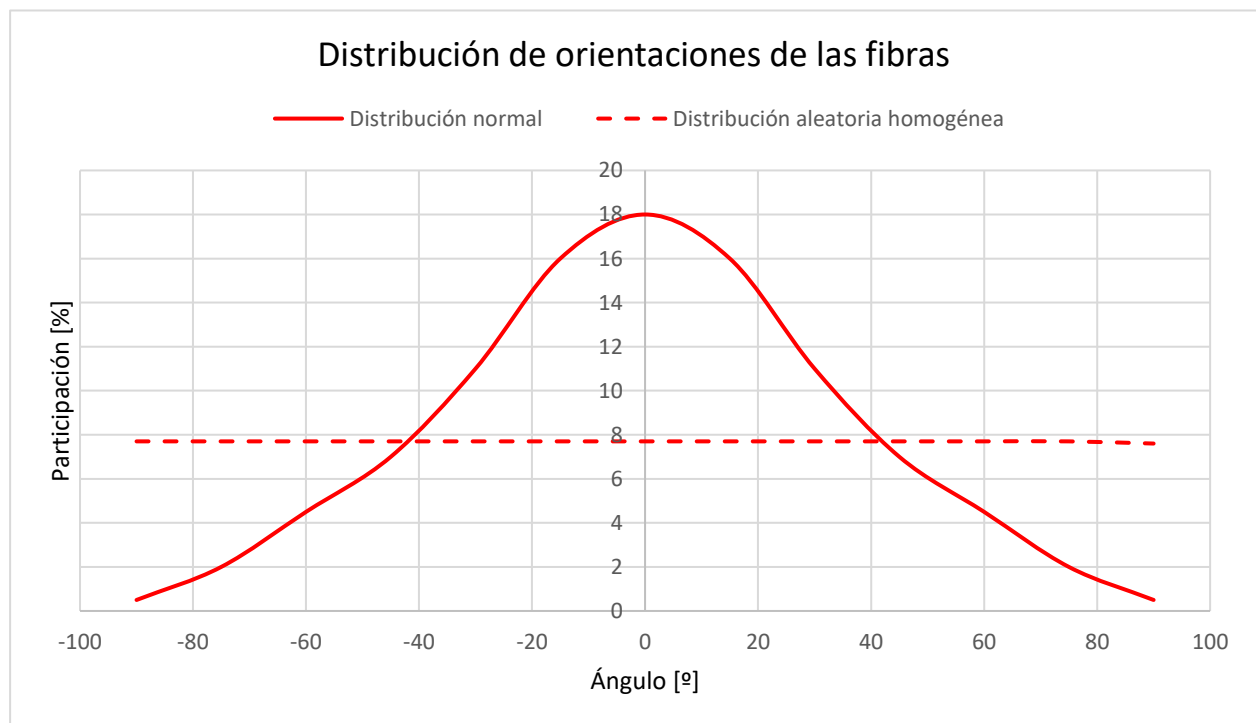


Figura 41: distribuciones de orientación de fibras elegidas

4.3.3. Condiciones de contorno

Para representar cómo está fijada la probeta en este ensayo, se han definido 3 grupos de líneas y 3 de puntos:

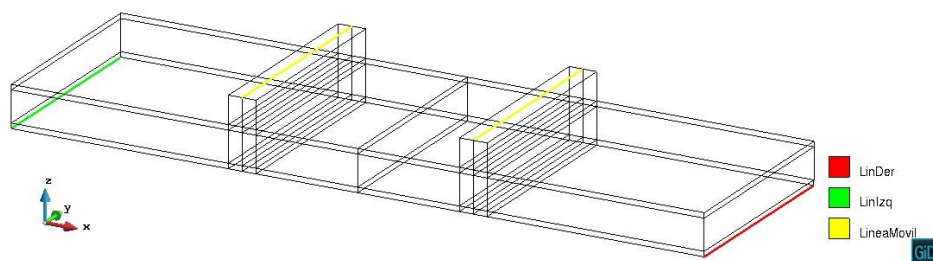


Figura 42: líneas con restricciones

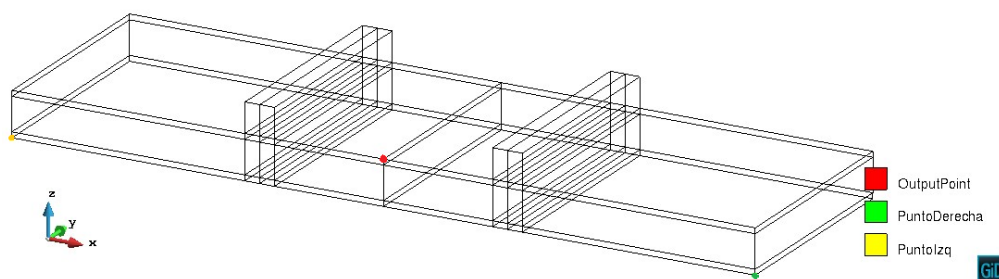


Figura 43: puntos con restricciones

Para simular el comportamiento y las sujeciones de la probeta lo más exactamente posible, cada elemento se ha restringido de la siguiente manera:

Elementos	Restricciones
Punto Derecha	Y, Z
Punto Izquierda	X, Y, Z
Línea Derecha	Z
Línea Izquierda	X, Z
Líneas Móviles	Z (-1.0)

Tabla 6: condiciones de contorno

El punto y línea de la derecha se dejan libres en X para permitir que la probeta se encoja debido a la flexión. Las líneas no se fijan en Y para permitir las deformaciones por el coeficiente de Poisson. En su lugar, tan solo se fija un punto en Y para que la estructura entera no pueda moverse en ese sentido, el punto de la izquierda.

En las líneas móviles se aplica un desplazamiento de 1mm que corresponde a la fuerza aplicada por la máquina del ensayo. El OutputPoint (en rojo) se define para que el programa pueda calcular la fuerza aplicada en función del desplazamiento en Z en este punto. Estos datos serán graficados y servirán para comparar visualmente la rigidez del modelo numérico respecto a la rigidez obtenida experimentalmente (ver resultados 4.3.5).

4.3.4.Malla seleccionada

A partir de lo aprendido en la validación de malla hecha en el capítulo 2, se ha elegido una malla estructurada, de elementos hexaédricos cuadráticos con 24960 elementos y 113069 nodos. Se puede visualizar esta malla en la siguiente figura:

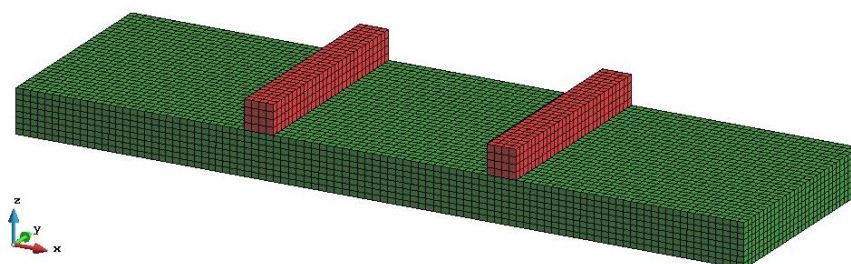


Figura 44: malla seleccionada

4.3.5.Primeros resultados obtenidos

El diagrama de tensiones resultante en la probeta es muy parecido al obtenido en el ensayo a flexión del capítulo 2. En la siguiente figura puede verse en diagrama de tensiones en el eje X, que son las mayores a flexión.

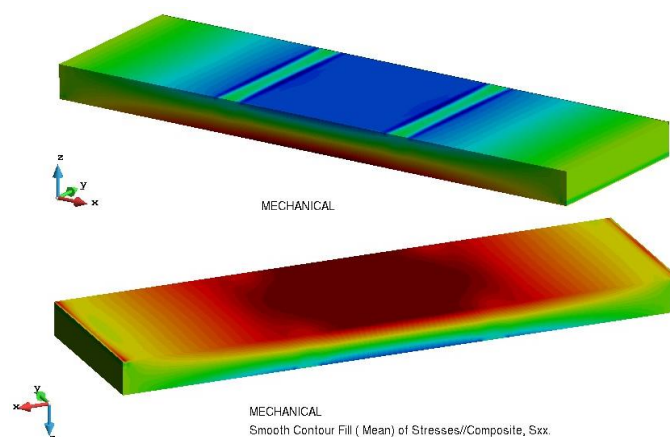


Figura 45: diagrama de tensiones en X resultantes en la probeta (vista superior e inferior)

En este caso, los valores de las tensiones no interesan, tan solo se ha presentado este diagrama para mejor entendimiento de los resultados. La zona superior trabaja a compresión (azul) y la inferior, a tracción (rojo).

A partir de todo lo definido hasta ahora, se ha calculado la estructura para las dos distribuciones de orientación de las fibras definidas anteriormente. La rigidez obtenida en ambas estructuras se representa en la siguiente figura, junto a las 5 rectas experimentales (azul), que son el objetivo del trabajo. En esta gráfica, la recta Flax5 (roja) corresponde a la distribución normal de la orientación de las fibras y la recta Flax6 (roja discontinua) corresponde a la distribución aleatoria homogénea (ver Figura 41).

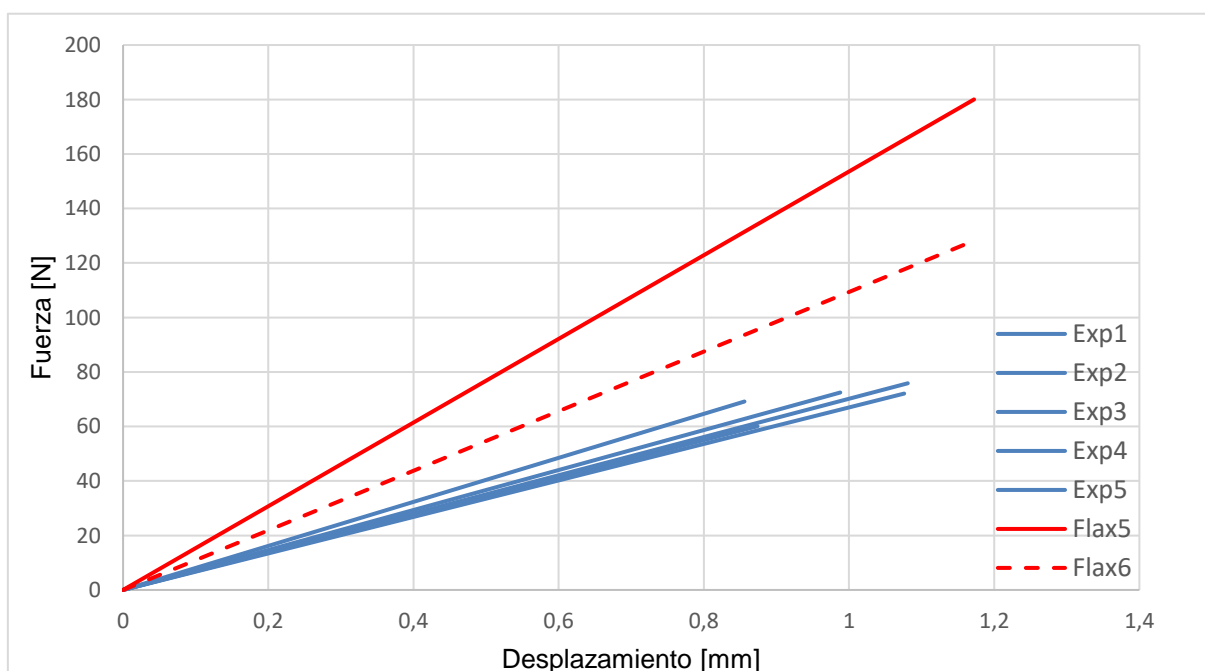


Figura 46: primeros resultados obtenidos

4.3.6. Conclusiones

Como puede verse, este primer modelo numérico es demasiado **rígido**.

Es lógico que la distribución normal (Flax5) proporcione más rigidez a la probeta, ya que gran parte de las fibras están orientadas en la dirección longitudinal, que es la que resiste mejor la tensión a la que se somete la probeta a flexión. Aunque la distribución homogénea (Flax6) sea menos rígida, sigue sin ser un buen resultado.

Se ha determinado que la causa de que el modelo sea tan rígido es que las propiedades de la fibra sean demasiado rígidas ($E_x = 50$ GPa), ya que son tomadas de fibras unidireccionales mucho más alineadas y uniformes que las que se están estudiando. La fibra de lino estudiada, como puede verse en la Figura 39, presenta mucha aleatoriedad y curvatura.

Por esta razón, se ha decidido hacer un análisis a doble escala mediante la teoría de homogenización para simular esta **curvatura** y obtener un módulo de Young (E) que represente la realidad del ensayo estudiado. Este procedimiento se explica en el siguiente apartado.

4.4. Determinación del módulo de elasticidad de las fibras de lino curvadas mediante el cálculo multiescala

4.4.1. Resumen

Para simular la curvatura y aleatoriedad de las fibras de lino estudiadas, se han creado dos elementos o volúmenes representativos del material, que se han utilizado como micro-modelos para el cálculo multiescala (**teoría de homogenización**). También se ha creado un macro-modelo muy simple de una viga traccionada. A este macro-modelo se le han asignado los micro-modelos mencionados, los cuales determinan el comportamiento del material. De este modo, el programa de cálculo PLCd es capaz de calcular las propiedades mecánicas equivalentes a este material compuesto definido numéricamente.

A partir de estas propiedades y de otros parámetros conocidos o que se han medido, se acaba calculando el valor del módulo de elasticidad de la fibra de lino estudiada.

4.4.2. Modelo numérico

En primer lugar, para crear el micro-modelo representativo del material en cuestión se ha partido de fotografías del material y la fibra estudiada (Figura 39). De esta fotografía se ha escogido una sección muy pequeña rectangular y se han seleccionado diversas fibras representativas.

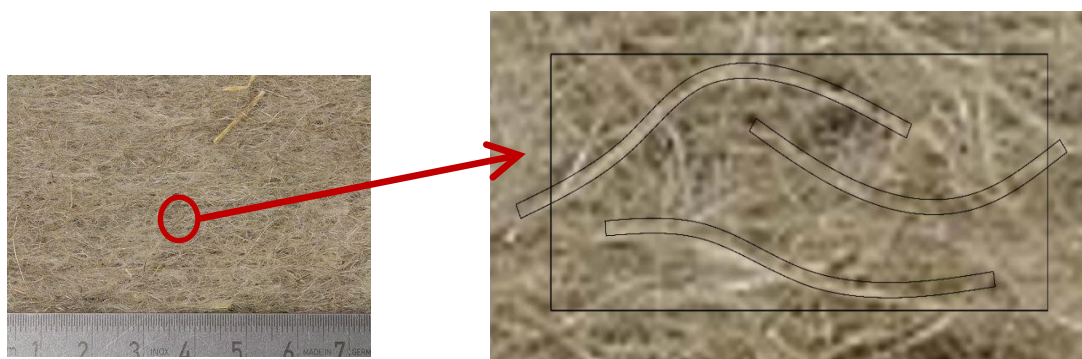


Figura 47: obtención de los micro-modelos representativos

El rectángulo se ha extruido en forma de caja y delimita los bordes del volumen, mientras que las fibras se han creado a partir de un círculo extruido a modo de “tubería”. En las siguientes figuras pueden visualizarse los dos micro-modelos: el volumen amarillo

corresponde a la matriz, mientras que el volumen azul, a las fibras. Se ha suprimido la mitad superior de la matriz para poder visualizar las fibras del interior del elemento.

Para este procedimiento se han utilizado los programas AutoCAD y Rhinoceros.

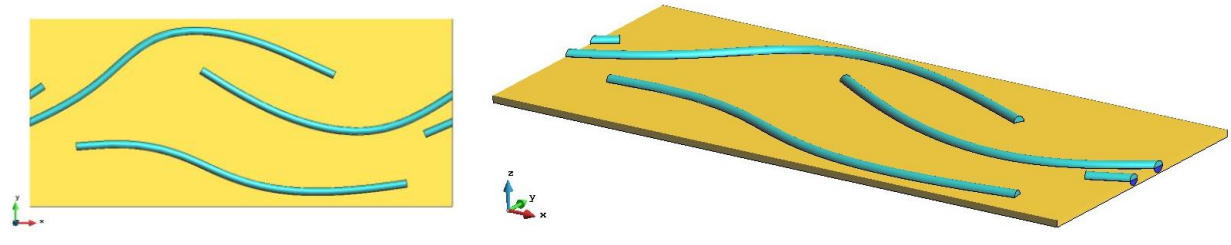


Figura 48: micro-modelo 1 (vista en alzado y perspectiva)

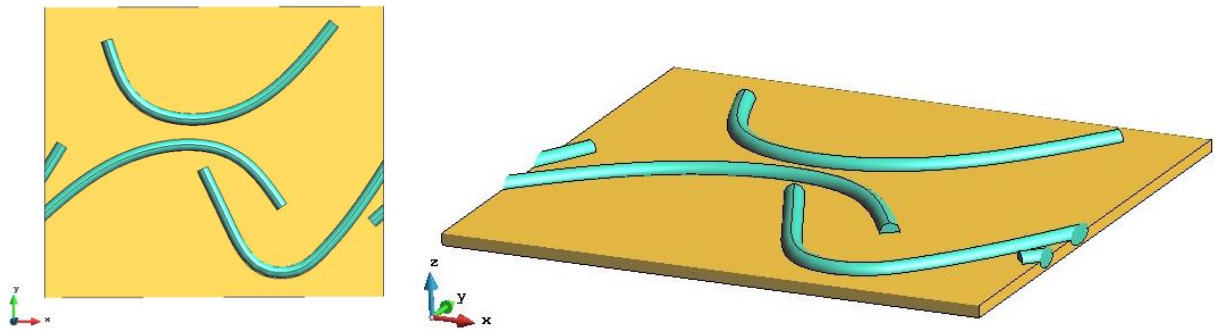


Figura 49: micro-modelo 2 (vista en alzado y perspectiva)

Como se puede observar, el micro-modelo 1 es más alargado, mientras que el micro-modelo 2 tiene las fibras mucho más curvadas, por lo que representa mejor el material. Se ha decidido crear estos dos micro-modelos para comprobar la diferencia que la curvatura de las fibras supone en cuanto a la rigidez del material.

Es importante que algunas fibras se intersequen con los bordes del elemento para asegurar la continuidad con el elemento siguiente y que su unión no sea de solo resina.

Tal y como se ha mencionado en el apartado 0, para que el modelo numérico sea correcto, hay que aplicar al micro-modelo unas **condiciones de contorno periódicas**. Esto se ha conseguido creando diversas superficies de contacto en las 6 caras del micro-modelo (etapa de pre-proceso con GiD). Estas superficies de contacto aseguran una correspondencia directa entre los nodos de cada una de las 6 caras del micro-modelo respecto a su cara opuesta. En otras palabras, los nodos de la cara superior se

corresponden a los de la inferior, igual que con las caras delantera y trasera y las caras derecha e izquierda (ver Figura 50).

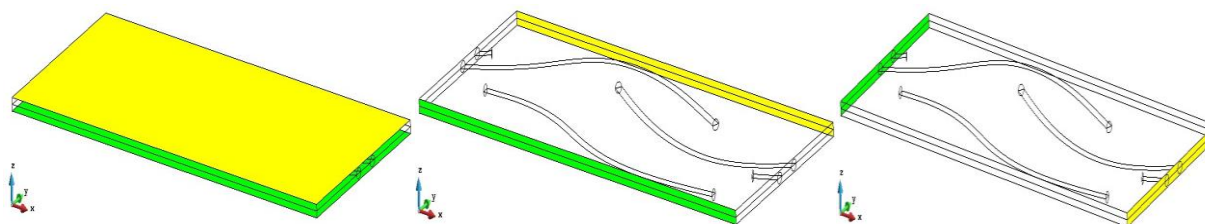


Figura 50: superficies de contacto (planos XY, XZ e YZ)

De este modo, se consigue que el micro-modelo se deforme en concordancia con los micro-modelos que lo rodean, para que así no aparezcan superposiciones de material o espacios vacíos.

Mencionar que, en estos dos micro-modelos, se han aplicado las mismas propiedades mecánicas de fibra de lino unidireccional (volumen azul) y resina epoxi (volumen amarillo) del apartado anterior. Es decir:

$$E_{fibra} = 50 \text{ GPa}; \quad E_{epoxi} = 2,7 \text{ GPa}$$

Estos dos micro-modelos se han calculado asociados a un **macro-modelo** muy simple y parecido al del apartado 0, solo que la fuerza se aplica longitudinalmente (eje X) y la viga trabaja a tracción (se fija el extremo izquierdo y se aplica un desplazamiento en el extremo derecho).

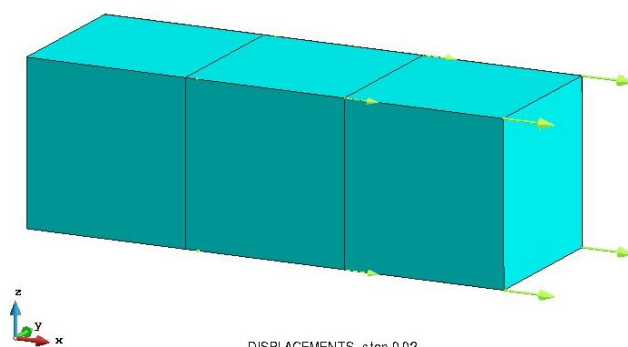


Figura 51: superficies de contacto (planos XY, XZ e YZ)

Este macro-modelo consta de una malla de tan solo 3 elementos hexaédricos, los cuales tienen 8 puntos de Gauss cada uno. El micro-modelo asignado determina el comportamiento del material en cada uno de estos puntos.

4.4.3. Teoría

Para poder calcular el módulo de elasticidad de la fibra de lino equivalente, se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$E^c = k^f \cdot E_{equiv}^f + k^m \cdot E^m \quad \Rightarrow \quad E_{equiv}^f = \frac{E^c - k^m \cdot E^m}{k^f} \quad (13)$$

Donde,

E^c Módulo de elasticidad del compuesto

E_{equiv}^f Módulo de elasticidad equivalente a las fibras de lino curvadas

E^m Módulo de elasticidad de la matriz

k^f Participación volumétrica de la fibra en el compuesto

k^m Participación volumétrica de la matriz en el compuesto

- El término E^m , como se ha comentado anteriormente, ya se conoce ($E_{epoxi} = 2,7 \text{ GPa}$).
- Los parámetros k^f y k^m se han calculado a partir de mediciones tomadas de la geometría 3D de los micro-modelos siguiendo la ecuación (1).
- El módulo E^c se extrae de los resultados obtenidos mediante el cálculo multiescala definido anteriormente.

Conociendo estos cuatro valores, a partir de la ecuación (13) se puede calcular el módulo E_{equiv}^f requerido.

4.4.4. Resultados obtenidos

En cuanto a los resultados, tan solo nos interesa la visualización en el caso de los dos micro-modelos. En las siguientes figuras se presentan los diagramas de tensión en X en ambos casos:

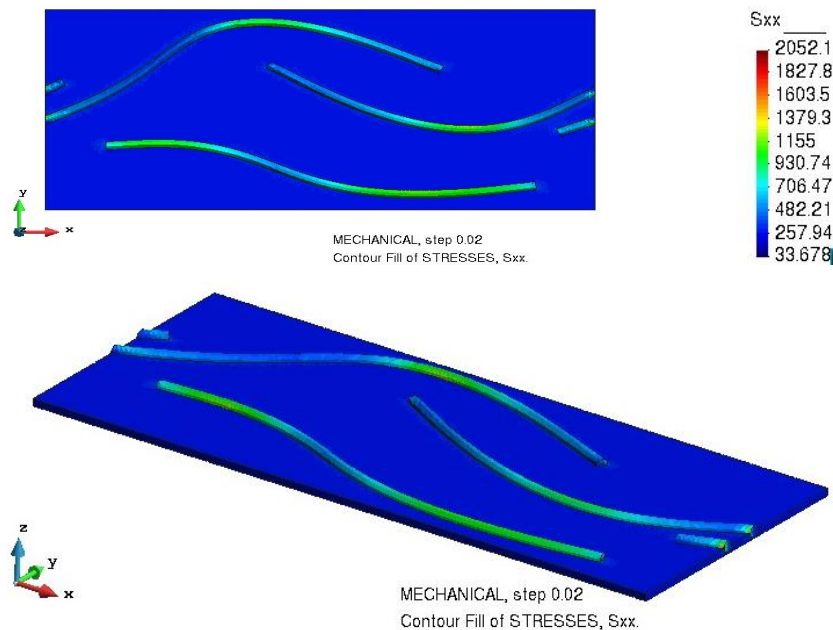


Figura 52: diagrama de tensiones en X del micro-modelo 1 (vista en alzado y perspectiva)

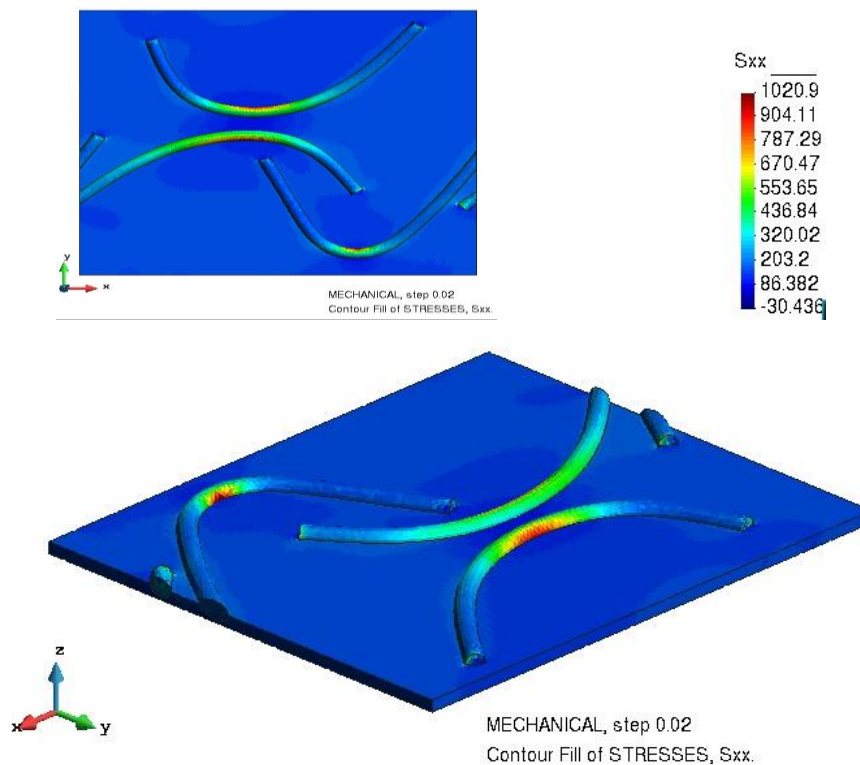


Figura 53: diagrama de tensiones en X del micro-modelo 2 (vista en alzado y perspectiva)

Como se puede observar, en ambos casos el elemento que más tensión soporta es la fibra, mientras que la matriz prácticamente no sufre tensión (color azul oscuro). Concretamente, aparecen picos de tensión en las zonas de las fibras orientadas longitudinalmente (0°), es decir, paralelas al eje X (color verde, amarillo y rojo).

Esto sucede porque, como se ha visto en el primer capítulo (Figura 3), las fibras tienen muchísima más resistencia cuando se someten a esfuerzos longitudinales. En cambio, a medida que la tensión se aplica de modo más transversal, su resistencia disminuye drásticamente.

Esta es la razón por la que se ha decidido hacer este análisis a doble escala del material, ya que el módulo de elasticidad $E_{fibr\ unid} = 50\ GPa$ utilizado anteriormente era de fibras unidireccionales, las cuales trabajan todas a 0° . En nuestro caso, al tener una gran parte de las fibras con orientaciones diferentes, la rigidez del material disminuye. En otras palabras, el módulo de elasticidad equivalente que se quiere calcular deberá ser mucho menor.

Efectivamente, los resultados obtenidos han sido los esperados. Estos se resumen en la tabla siguiente:

	Micro-modelo 1	Micro-modelo 2
E^c [MPa]	3768,78	3272,60
k^f [%]	5,93	6,84
k^m [%]	94,07	93,16
$E_{equiv}^{fib\ lino}$ [GPa]	20,72	11,07

Tabla 7: resultados del análisis multiescala

Lógicamente, el segundo micro-modelo tiene un módulo menor, ya que sus fibras están mucho más curvadas, mientras que en el primer micro-modelo las fibras están más alargadas longitudinalmente.

4.5. Caracterización final del compuesto

4.5.1. Modelos calculados

Se han calculado 4 modelos diferentes para poder comparar los resultados. Estos modelos numéricos son iguales que el que se ha definido en el apartado 4.3 (misma geometría, condiciones de contorno, malla, etc.), calculados mediante la teoría de mezclas serie-paralelo.

La única diferencia es que se han cambiado los módulos de elasticidad iniciales por los que se han obtenido mediante el cálculo multiescala y se han estudiado dos distribuciones de orientaciones de fibra diferentes. La siguiente tabla resume estos 4 modelos:

Modelo	Ef [GPa]	Distribución de orientaciones de fibra	Representación de rigidez	Tiempo de cálculo [min]
M1H	20,72	Homogénea	-----	8:27
M1N	20,72	Normal	—————	8:24
M2H	11,07	Homogénea	-----	8:40
M2N	11,07	Normal	—————	8:46

Tabla 8: modelos calculados

4.5.2. Resultados finales obtenidos

Para visualizar y comparar las rigideces obtenidas en estos 4 modelos, se han creado dos gráficas, una para cada módulo de elasticidad obtenido.

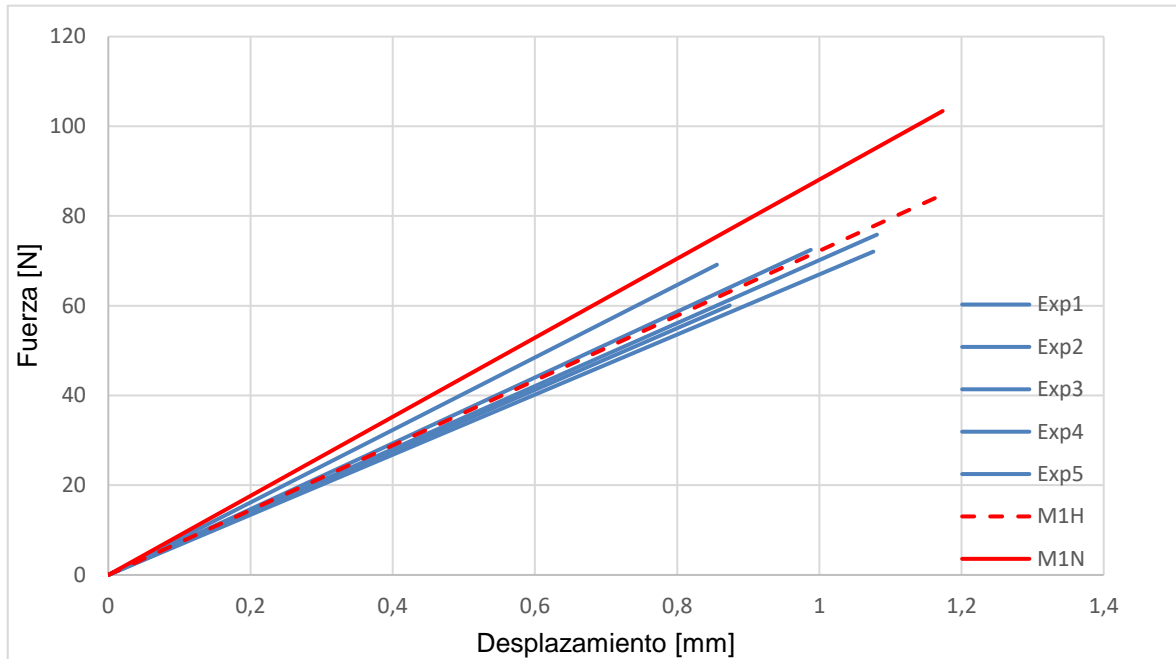


Figura 54: resultados con módulo $E_{f1} = 20,72$ GPa

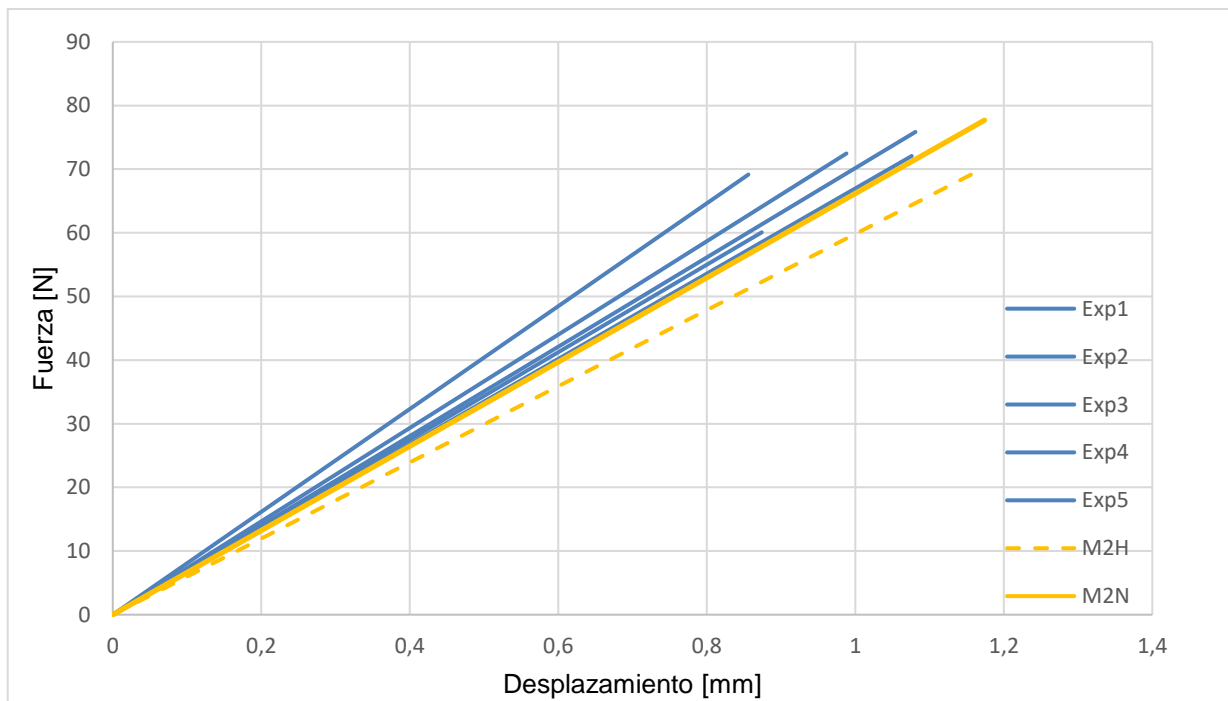


Figura 55: resultados con módulo $E_{f2} = 11,07$ GPa

Como se puede observar, el modelo M1N es demasiado rígido (queda por encima de las curvas experimentales), ya que tiene el mayor módulo E_f y la distribución normal, que como se ha comentado anteriormente es más rígida.

En cambio, el modelo M2H es demasiado blando o flexible (queda por debajo de las curvas experimentales), ya que es el que tiene menor módulo E_f y la distribución homogénea, que es menos rígida.

Por tanto, los modelos más adecuados serán el M1H y el M2N, que son muy parecidos. Entre estos dos, se ha decidido que el más correcto, preciso y que representa mejor el material estudiado es el **M2N**.

Se ha optado por este principalmente porque corresponde a una distribución normal de las fibras, lo cual representa mucho mejor la fibra de lino analizada que la distribución homogénea. Por ejemplo, si se observa la Figura 39, puede verse que existe una cierta orientación longitudinal (horizontal) de las fibras debido al procedimiento de cardado al que se han sometido. Además, el micro-modelo a partir del cual se ha calculado el módulo de elasticidad de este modelo M2N representa mucho mejor la curvatura del material y es más correcto que el primero (Figura 49).

5. Conclusiones

En primer lugar, mencionar que, aunque los resultados del trabajo sean bastante correctos, existen posibles **mejoras** o campos en los que se podría profundizar. Por ejemplo, un factor que no se ha tenido en cuenta en el análisis multiescala ha sido la variabilidad del diámetro de las fibras. En ambos micro-modelos creados se ha impuesto un diámetro estándar para todas las fibras, cuando en la realidad este tipo de fibras tienen diámetros muy variables. Otro aspecto que mejoraría el estudio sería aumentar el número de probetas ensayadas (en nuestro caso solo 5 probetas). De este modo, se tendrían muchos más resultados experimentales y sería más fácil determinar qué modelo numérico se ajusta más a la realidad.

Además, si se quisiera hacer un estudio mucho más detallado, habría que analizar con mucho más detalle la fibra de lino con la que se trabaja, concretamente su curvatura y la distribución de las orientaciones de las fibras. De este modo se podrían crear micro-modelos mucho más realistas y representativos que proporcionaran resultados más precisos. En nuestro caso, este análisis de la fibra se ha hecho a partir de una fotografía (Figura 39), lo cual limita mucho el estudio realizado.

Todos estos factores mencionados hacen que sea comprensible un pequeño porcentaje de error en la simulación realizada, ya que se trata de un material muy complejo y aleatorio geométricamente. Asimismo, en mi opinión la simulación resultante ha sido bastante buena.

En cuanto a **viabilidad**, en mi opinión el material estudiado no sería muy útil hoy en día en la industria naval, aunque puede que en un futuro los avances tecnológicos lo permitan. Digo esto porque hoy en día la inmensa mayoría de embarcaciones de recreo están fabricadas en fibra de vidrio, que como se ha visto al principio del trabajo es bastante mejor que el lino (mejores propiedades mecánicas, menor precio, etc.). Además, el lino tiene el principal inconveniente de tener un 7% de absorción de agua. Esto implica que en el ambiente marino no es muy adecuado y deberá protegerse con resinas mucho más caras que en el caso del vidrio.

En cambio, en la industria aeronáutica sí podría tener aplicaciones, ya que los aviones precisan de materiales muy ligeros también en zonas no estructurales como el interior de la cabina o en elementos estructurales secundarios. Estas aplicaciones son las que se están estudiando desde el proyecto Eco-Compass mencionado al principio del trabajo.

En lo referente a las **teorías de simulación de compuestos** estudiadas durante el trabajo, se ha comprobado lo siguiente. Por un lado, la teoría de mezclas serie-paralelo es muy potente y versátil, es decir, permite calcular fácilmente grandes estructuras simples. En cambio, su principal inconveniente es que no es útil para calcular estructuras de materiales compuestos complejos. Por otro lado, la teoría de homogenización sí permite esto, de hecho, es su principal utilidad. Esta teoría es capaz de calcular estructuras complejas cuyo comportamiento no puede definirse mediante ecuaciones constitutivas. Asimismo, su principal inconveniente es el elevado coste computacional que conlleva.

Por tanto, tal y como se ha podido comprobar en la simulación realizada en este trabajo, estas dos teorías funcionan muy bien juntas ya que se complementan entre sí. Este hecho es muy parecido al que ocurre con las fibras y las resinas, cuyas propiedades se complementan muy bien al juntarlas para formar un material compuesto.

Además, mencionar que la simulación que se ha hecho de la fibra de lino también podría hacerse para otros compuestos más comunes en la industria naval como son fibras de vidrio o de carbono. El procedimiento sería muy parecido y podría aplicarse a cualquier estructura textil existente (fieltros, tejidos, ensamblados...).

A partir de la asignatura de cálculo numérico de la carrera y mediante la elaboración de este trabajo he podido comprobar rotundamente que el **cálculo numérico** de estructuras mediante el método de elementos finitos es una herramienta muy potente, útil e interesante para un ingeniero. Personalmente, me parece un recurso con muchísimas aplicaciones y que debería estudiarse en cualquier carrera de ingeniería en la que intervengan los cálculos estructurales (ingeniería de caminos, mecánica, industrial, naval, aeronáutica, de materiales, arquitectura, etc.). Además, el método de elementos finitos es muy versátil y se puede aplicar en muchos otros campos como acústica, mecánica de fluidos, electromagnetismo y termodinámica.

Finalmente, solo mencionar que este trabajo se ha realizado como colaboración con el proyecto europeo *H2020 Ecological and Multifunctional Composites for Application in Aircraft Interior and Secondary Structures* (Eco-Compass) [23] y ha permitido presentar una parte de los resultados obtenidos en los congresos [21] y [22], cuyos resúmenes aparecen como anexos.

Bibliografía

- [1] Besednjak, Alejandro. *Materiales compuestos: procesos de fabricación de embarcaciones*. Barcelona: Edicions UPC, 2005. ISBN 978-84-8301-820-0.
- [2] Saleh, Hosam El-Din M. *Polyester*. s.l.: InTech, 2012. pp.136-147.
- [3] Martínez, G.; Besednjak, A. *Métodos de producción con materiales compuestos*. 2017. Apuntes de asignatura.
- [4] Martínez, Xavier. *Guide for Multiscale Analysis*. 2018. Guía para el cálculo multiescalar con PLCd.
- [5] Oller, S. et al. *Manual PLCd*. 2016. Manual sobre la estructura de entrada de datos de PLCd.
- [6] Amigó V. et al. Aprovechamiento de residuos de fibras naturales como elementos de refuerzo de materiales poliméricos. *Quinto congreso internacional de fibras naturales, 2009*.
- [7] D. Scida, A. Bourmaud, and C. Baley, "Influence of the scattering of flax fibres properties on flax/epoxy woven ply stiffness," *Mater. Des.*, vol. 122, pp. 136–145, May 2017.
- [8] G. Coroller, A. Lefeuvre, A. Le Duigou, A. Bourmaud, G. Ausias, T. Gaudry, and C. Baley, "Effect of flax fibres individualisation on tensile failure of flax/epoxy unidirectional composite," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 51, pp. 62–70, Aug. 2013.
- [9] Ms. Loh Yueh Feng. *The Biomaterial for Green Composites*. Artículo de JECmagazine Composites N° 55.
- [10] Lineo. *Pioneering eco-friendly mini transat 6.50 sailing boat prototype made with flax fibers* [en línea]. [Consulta: 09/06/2018]. Disponible en: <http://www.lineo.eu/download/Business%20Case%20-%20Araldite%20Boat.pdf>
- [11] García, J.; Martínez, X. *Cálculo numérico de estructuras navales*. 2017. Apuntes de asignatura.
- [12] Turon, F. *Análisis y optimización de una estructura naval de material compuesto mediante cálculo multiescala*. Trabajo final de grado, UPC, Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas, 2017 [UPCCommons]
- [13] Ruiz, A. *Simulación del comportamiento no lineal de materiales compuestos*. Trabajo final de grado, UPC, Departamento de Ciencia e Ingeniería Náuticas, 2017 [UPCCommons]
- [14] GiD. *GiD Reference Manual* [en línea]. [Consulta: 11/06/2018]. Disponible en: <https://www.gidhome.com/support/gid-manuals/>
- [15] Martínez, X.; Yebra, D. *Estructuras aplicadas a la ingeniería naval*. 2017. Apuntes de asignatura.

- [16] Martínez, X.; Oller, S. y Rastellini, F. Análisis no lineal de materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie-paralelo. *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*. OmniaScience, 2014, pp.237-260.
- [17] D. Herzog, P. Jaeschke, O. Meier, and H. Haferkamp. Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 48, no. 12–13, pp. 1464–1473, Oct. 2008.
- [18] E. Oñate, *Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos*, 2a Ed. CIMNE. Barcelona, 1995.
- [19] RUA. *Prontuario básico de estructuras simples* [en línea]. [Consulta: 17/06/2018]. Disponible en:
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25612/1/Estructuras%20Met%C3%A1licas%20-%20Material%20apoyo.pdf>
- [20] Universidad de Sevilla. *Asociación de muelles en serie y en paralelo* [en línea]. [Consulta: 17/06/2018]. Disponible en:
[http://laplace.us.es/wiki/index.php/Asociaci%C3%B3n_de_muelles_en_serie_y_en_paralelo_\(GIA\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Asociaci%C3%B3n_de_muelles_en_serie_y_en_paralelo_(GIA))
- [21] X. Martinez, G. Segui, G. Bugeda, S. Oller. Numerical characterization of non-woven eco-composites for aeronautical structures. *8th EASN-CEAS International Workshop on Manufacturing for Growth & Innovation*. 4-7 September 2018. Glasgow, UK.
- [22] X. Martinez, L. Barbu, G. Segui, G. Bugeda, S. Oller. Homogenization procedures for the analysis of eco-composites for aeronautical structures. *10th International Conference on Green Composites*. November 7-9, 2018, Quanzhou, China.
- [23] Eco-Compass. *Web del proyecto Eco-Compass, con el que se ha colaborado* [en línea]. [Consulta: 18/06/2018]. Disponible en: <http://www.eco-compass.eu/>

Anexo 1. Abstract conferencia Glasgow

Numerical characterization of non-woven eco-composites for aeronautical structures

X. Martinez^{1,2}, G. Segui², G. Bugeda^{1,3}, S. Oller^{1,3}

1. Centre Internacional de Metodes Numerics a l'Enginyeria (CIMNE), Barcelona, Spain

2. Department of Nautical Science and Engineering, UPC, Barcelona, Spain

3. Department of Civil and Environmental Engineering, UPC, Barcelona, Spain

Abstract:

The environmental advantages in weight reduction that have been accomplished by using composite materials in aeronautical structures can be overshadowed by the difficulties that present these materials for their disposal and recyclability. In this scenario, eco-composite materials made with natural or recycled fibres are an excellent alternative to reduce the environmental footprint of low-weight materials. However, in order for eco-composites to be a real alternative to synthetic composites, it is necessary to improve the existing knowledge about them, as well as to have analysis and simulation tools capable of representing accurately their structural performance, so that the structures designed with them comply with the required security, functionality and quality standards.

Current work focuses its attention in non-woven composites made of recycled carbon and flax fibres, and presents the developments made on available numerical tools for their correct characterization. The numerical characterization of non-woven composites presents several challenges. Although it is possible to give some predominant alignment to the fibres, most of them are randomly distributed. The curviness of the fibres, which also has a random component, leads to a significant reduction of their stiffness. And, last, but not least, the composite properties have a significant dispersion of their mechanical parameters due to thickness variations, different volume fractions of the components or, directly, by the existing dispersion in the mechanical properties of natural materials.

The formulation that is used to characterize non-woven eco-composites is based on the serial-parallel mixing theory [1]. This is a phenomenological homogenization procedure, based on defining several compatibility equations between the composite components. When applied to unidirectional composites, the serial-parallel mixing theory usually defines a iso-strain condition

in the fibre direction and a iso-stress condition in the other directions. In order to use this formulation for non-woven eco-composites, it is necessary to modify it to account for their particularities. Specifically, the fibre stiffness has been substantially reduced to account for the geometric deformations induced by its curviness; and the composite orientation is accounted by defining a normal distribution on the fibre orientation inside the material. The effects of material dispersion are not taken into account at a constitutive level and should be considered when defining the numerical finite element model.

The performance of the modifications made on the serial-parallel mixing theory have been analysed comparing the numerical and experimental results obtained from a four-node bending test made on non-woven eco-composites. Two different eco-composites have been analysed, one made only with non-woven flax fibres, and another one that contains 25% of non-woven recycled carbon fibres and a 75% of non-woven flax fibres. In this last one carbon fibres are placed as upper and lower layers in the composite. The results obtained validate the approach followed to characterize these materials.

Acknowledgements: This work has been supported the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 690638 (Eco-Compass project).

References: [1] DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.09.013

Session:

Session: Polymer Composites in Aerospace: Design and manufacturing challenges

Keywords:

Eco-composites, non-woven, constitutive model, serial-parallel mixing theory, fem

Anexo 2. Abstract conferencia China

The 10th International Conference on Green Composites

November 7-9, 2018, Quanzhou, P. R. China

HOMOGENIZATION PROCEDURES FOR THE ANALYSIS OF ECO-COMPOSITE FOR AERONAUTICAL STRUCTURES

Xavier Martinez

International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). Department of Nautical Science and Engineering (UPC)
Barcelona, Spain

Lucia Barbu

International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE)
Barcelona, Spain

Gonçal Seguí

Department of Nautical Science and Engineering (UPC)
Barcelona, Spain

Sergio Oller

Department of Civil and Environmental Engineering (UPC). CIMNE
Barcelona, Spain

Gabriel Bugeda

Department of Civil and Environmental Engineering (UPC). CIMNE
Barcelona, Spain

ABSTRACT

The environmental advantages in weight reduction that have been accomplished by using composite materials in aeronautical structures can be overshadowed by the difficulties that have these materials for their disposal and recyclability. In this scenario, eco-composite materials made with natural or recycled fibres are an excellent alternative to reduce the environmental footprint of low-weight materials. However, in order for eco-composites to be a real alternative to synthetic composites, it is necessary to improve the existing knowledge about them, as well as to have analysis and simulation tools capable of representing accurately their structural performance. This will ensure that the structures designed with them comply with the required security, functionality and quality standards.

Current work proposes two different strategies, based on homogenization procedures, to simulate the mechanical performance of eco-composites. The first one is a phenol-menological homogenization. The serial-parallel mixing theory [1]. This is based on establishing compatibility relations between the composite components, in terms of iso-strain and iso-stress conditions. With this approach, each composite constituent can be characterized by its own constitutive law, and the non-linear behaviour of the composite is obtained straightforward from its constituents

performance. The main advantage of this procedure is that it provides a good prediction of most of the complex failure phenomena that suffer composites, such as delamination, with an affordable computational cost.

The second procedure proposed is a numerical homo-genization, based on a multiscale strategy [2]. This approach is used when the composite internal micro-structure, and the interaction between the different composite constituents is so complex that its mechanical performance cannot be predicted neither with a constitutive law, nor with procedures such as the serial-parallel mixing theory. In this case it is necessary to define a representative volume element (RVE) of the composite, and to use it as the material constitutive equation. The strain state of the composite is sent to the RVE model which, after being analysed, returns the composite stresses associated to the strain state.

These two homogenization procedures will be used to obtain the mechanical response of different eco-composites in the framework of the Chinese-European collaboration project ECO-COMPASS. The selection of the most suitable procedure depends on the type of composite to be analysed. This is, while a numerical homogenization will provide a more detailed insight of the mechanical performance of the composite, this strategy cannot be used if the internal structure of the composite is unknown or, in cases such as non-woven composites, is too random to be representative for the whole structure. In these cases, the serial-parallel mixing theory can provide a better prediction, as it is easier to include in it a larger variation of the composite properties. Examples on how these two formulations are used will be presented to illustrate how they can be applied, their performance and their capabilities.

ACKNOWLEDGMENTS

This work has been supported the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 690638 (Eco-Compass project).

REFERENCES

[1] X. Martinez, F. Rastellini, S. Oller, F. Flores, E. Oñate. Computationally optimized formulation for the simulation of composite materials and delamination failures. *Comp. B: Engineering*. Vol. 42(2): 134-144. 2011. DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.09.013.

[2] F. Otero, S. Oller, X. Martinez. Multiscale Computational Homogenization: Review and Proposal of a New Enhanced-First-Order Method, *Archives of Comp Meth Eng*. Vol. 25(2): 479–505. 2018. DOI: 10.1007/s11831-016-9205-0.